

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE  
CAMPUS CASCAVEL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO UTILIZANDO  
INFILTRÔMETROS DE CILÍNDRO ÚNICO**

**JIANICE PIRES FRIGO**

**CASCAVEL - PARANÁ - BRASIL**

**ABRIL - 2017**

JIANICE PIRES FRIGO

**INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO UTILIZANDO  
INFILTRÔMETROS DE CILÍNDRO ÚNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

CASCAVEL - PARANÁ - BRASIL

ABRIL – 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F949i

Frigo, Jianice Pires

Infiltração da água em latossolo vermelho distroférico utilizando  
infiltrômetros de cilindro único. / Jianice Pires Frigo. Cascavel, 2017.  
52 f.

Orientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello  
Revisora: Ana Maria Vasco

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,  
Campus de Cascavel, 2017.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

1. Irrigação. I. Mello, Eloy Lemos de. II. Vasco, Ana Maria, rev. III.  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 20.ed. 631.587  
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

## JIANICE PIRES FRIGO

Infiltração da Água em Latossolo Vermelho Distroférrico Utilizando Infiltrômetros de Cilindro Único

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

  
Orientador(a) - Eloy Lemos de Mello

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

  
Jonathan Dieter

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

  
Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 19 de abril de 2017

## BIOGRAFIA

**Jianice Pires Frigo** - Filha de Terezinha Pires Frigo e Carlos Assis Frigo, nascida em 19 de julho de 1986, natural da cidade de Santiago, estado do Rio Grande do Sul. Em fevereiro de 2015, graduou-se em Agronomia pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – *Campus* Santiago. Em março de 2015, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, nível Mestrado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE - *Campus* Cascavel, Área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

# INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO UTILIZANDO INFILTRÔMETROS DE CILÍNDRO ÚNICO

## RESUMO

O entendimento do processo de infiltração e das suas relações com as propriedades do solo é fundamental para o eficiente manejo do solo e da água. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a infiltração de água em uma área de latossolo vermelho, para tanto, foram utilizados infiltrômetros de único cilindro, de diferentes diâmetros. Além disso, objetivou-se comparar o desempenho desses cilindros de 7 (A7) e de 15 cm (A15), relacionar a umidade e a densidade aparente do solo à infiltração da água e avaliar a distribuição espacial da infiltração. Foram avaliados 24 pontos de coleta de dados, alocados em 8 parcelas de um talhão circular preparado para plantio em regime de permacultura, denominado mandala. Gráficos de Shewhart e o índice de capacidade de processo foram utilizados para a comparação entre os cilindros e inverso do quadrado da distância para interpolação de dados. Verificou-se que a taxa de infiltração estável média, determinada com o cilindro A7, foi de  $196,79 \text{ mm h}^{-1}$  e com o cilindro A15 foi de  $187,30 \text{ mm h}^{-1}$ , cuja diferença foi de 5,6 %. A capacidade de processo foi estimada em 0,61 para A7 e 1,62 para A15, a qual foi considerada adequada para o cilindro A15, porém inadequada para cilindro A7. Desta forma, neste trabalho, concluiu-se que as taxas de infiltração estáveis e determinadas pelos cilindros foram compatíveis com as taxas determinadas por outros métodos em outros trabalhos. Em relação ao desempenho dos infiltrômetros de cilindros únicos, conclui-se que, embora ambos os cilindros tenham apresentado processos controlados e não tenham diferido estatisticamente, o cilindro A15 apresentou menos variabilidade dos dados, e pode ser considerado adequado em função do seu índice de capacidade de processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** gráfico de Shewhart; índice de capacidade do processo; Interpolação por inverso do quadrado das distâncias; taxa de infiltração estável.

# WATER INFILTRATION IN DYSTROPHIC RED LATOSOL USING SINGLE CYLINDER INFILTROMETERS

## ABSTRACT

The infiltration process understanding and its relationship with soil properties is essential for the efficient management of soil and water. Thus, this paper aimed at evaluating water infiltration in an area of Oxisol, using single ring infiltrometers with different diameters. In addition, it also aimed at comparing the performance of 7 cm (A7) and 15 cm (A15) cylinders, matching soil moisture and bulk density to water infiltration and evaluating spatial distribution of infiltration. For this purpose, 24 data points were evaluated, placed in 8 plots of a circular area prepared for permaculture cropping, named as Mandala. Shewhart graphs and process capability index were used to compare cylinders and the inverse of distance square for data interpolation. It was observed that the average stable infiltration rate, determined with A7 cylinder, was  $196.79 \text{ mm h}^{-1}$  and with A15 cylinder was  $187.30 \text{ mm h}^{-1}$ , consequently, there was a difference of 5.6%. The process capacity was estimated at 0.61 for A7 and 1.62 for A15, considered adequate for A15 and inadequate for A7 cylinder. Thus, it was concluded that the infiltration rates that were stabilized and determined by the cylinders were compatible with the rates determined by other methods in other papers. Regarding the performance of single-ring infiltrometers, it is concluded that, although both cylinders presented controlled processes, and did not differ statistically, cylinder A15 presented less variability on data, and may be considered adequate due to its process capability index.

**KEYWORDS:** Shewhart graph; Process capability index; Inverse square interpolation of distances; stable infiltration rate.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>8</b>  |
| 3.1 Infiltração da água no solo .....   | 8         |
| 3.2 Métodos de determinação da taxa de infiltração .....                          | 10        |
| 3.3 Infiltração em Latossolo .....  | 12        |
| 3.4 Controle estatístico de processo aplicado à infiltração de água no solo ..... | 14        |
| 3.5 Interpolação de dados de infiltração de água no solo.....                     | 15        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>17</b> |
| 4.1 Localização e caracterização experimental .....                               | 17        |
| 4.2 Coleta de amostras de solo para estimativa de umidade do solo .....           | 18        |
| 4.3 Coleta de amostras de solo para estimativa da densidade aparente.....         | 18        |
| 4.4 Infiltração da água com cilindro único .....                                  | 19        |
| 4.5 Análise estatística .....   | 21        |
| 4.6 Interpolação e mapas de distribuição espacial .....                           | 22        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>23</b> |
| 5.1 Curvas de Infiltração .....   | 23        |
| 5.2 Taxa de infiltração estável estimada pelos cilindros A7 e A15.....            | 30        |
| 5.3 Lâmina de Infiltração acumulada estimada pelos cilindros A7 e A15.....        | 34        |
| 5.4 Distribuição espacial dos dados e interpolação .....                          | 36        |
| 5.5 Gráficos de controle de Shewhart .....  | 38        |
| <b>CONCLUSÕES</b> .....   | <b>40</b> |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | <b>40</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | <b>42</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Figura 1 Croqui da área experimental e pontos de coleta de dados, numerados de 1 a 24.                | 17                                   |
| Figura 2 Mapa georreferenciado da mandala e dos pontos de coleta.                                     | 18                                   |
| Figura 3 Cilindro metálico para o teste de infiltração e materiais de utilização.                     | 20                                   |
| Figura 4 Curvas de infiltração ajustadas para os 24 pontos amostrais para o cilindro A7               | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| Figura 5 Curvas de infiltração ajustadas para os 24 pontos amostrais para o cilindro A15              | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| Figura 6 Boxplot para as taxas de infiltração estáveis nos cilindros A7 e A15.                        | 31                                   |
| Figura 7 Taxas de infiltração estável, mensuradas com os cilindros A7 e A15 nos 24 pontos amostrais.  | 33                                   |
| Figura 8 Razão entre as taxas de infiltração dos cilindros A15 e A7 nos 24 pontos amostrais.          | 33                                   |
| Figura 9 Interpolação para os dados de taxa de infiltração estável, obtidos a partir do cilindro A7   | 36                                   |
| Figura 10 Interpolação para os dados de taxa de infiltração estável, obtidos a partir do cilindro A15 | 37                                   |
| Figura 11 Interpolação para os dados de umidade inicial do solo                                       | 37                                   |
| Figura 12 Interpolação para os dados de densidade do solo   | 38                                   |
| Figura 13 Gráfico de controle de Shewhart para a taxa de infiltração estável com o cilindro A7        | 39                                   |
| Figura 14 Gráfico de controle de Shewhart para a taxa de infiltração estável com o cilindro A15       | 39                                   |

## 1. INTRODUÇÃO

A infiltração da água no solo é a passagem da água da superfície para o interior do solo. Este processo pode ser influenciado por uma série de fatores, tais como umidade, porosidade, cobertura, condições topográficas do solo, além de muitos outros.

A infiltração consiste em uma das principais componentes do ciclo hidrológico por se tratar do veículo de reposição da umidade do solo bem como do reabastecimento do lençol freático, pois reduz o escoamento superficial e conseqüentemente a erosão do Solo. É possível a intervenção de problemas práticos como drenagem, cálculos de vazões, estabilidade de massas do solo dentre outros, a partir de estudos detalhados sobre a infiltração, além do dimensionamento de sistemas de irrigação e melhorias do desempenho de modelos hidrológicos.

Dentre as várias formas utilizadas para determinar a infiltração no campo, alguns autores destacam os simuladores de chuva, os permeâmetros e os infiltrômetros. Porém, de acordo com Pruski et.al (1997), a determinação da infiltração de água no solo deve ser feita por métodos simples e capazes de representar adequadamente as condições em que se encontra o solo.

Os infiltrômetros de cilindros concêntricos são instrumentos para determinação direta da capacidade de infiltração do solo e são bastante difundidos por apresentarem, normalmente, configuração de baixa complexidade, facilidade de manejo e de baixo custo (SIMÕES; FIGUEIRÊDO; SILVA, 2005). Uma simplificação deste método consiste na utilização de apenas um cilindro. Assim, o entendimento do processo de infiltração e das suas relações com as propriedades do solo de forma mais simplificada é fundamental para o eficiente manejo do solo e da água de forma rápida e com menor custo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a infiltração de água em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico Típico, utilizando infiltrômetros de cilindro único com dois diâmetros diferentes.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Comparar o desempenho de infiltrômetros de cilindros únicos, de sete e quinze centímetros de diâmetro, em relação à estimativa da infiltração da água no solo, utilizando técnicas de controle estatístico de processo (gráficos de controle);
- b) Avaliar a infiltração da água em função da distribuição espacial das coletas;
- c) Analisar a capacidade de processo dos infiltrômetros para medida da taxa de infiltração.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Infiltração da água no solo

Infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo que perdura enquanto houver disponibilidade de água em sua superfície (HORTON, 1933; REICHARD & TIMM, 2004).

A infiltração e a permeabilidade permitem o escoamento da água através dos espaços vazios existentes no perfil do solo. É um processo que depende da disponibilidade de água, da natureza e da camada superficial do solo, além de ser importante para a solução de problemas práticos relacionados à drenagem, ao rebaixamento do nível d'água, cálculo de vazões, estudo de recalques e à estabilidade de massas do solo (DURLO et al., 2016).

A infiltração de água no perfil de solo, o acúmulo e escoamento na sua superfície são os principais processos compartimentalizadores da água proveniente da precipitação. Quando a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, o excedente escoar e pode causar erosão, perda da capacidade produtiva do solo, poluição de mananciais hídricos e aumento na frequência e intensidade de enchentes (OLIVEIRA, 2015).

A taxa de infiltração máxima que pode acontecer em dado instante de tempo é dependente do gradiente de energia da água e da condutividade hidráulica, os quais são dependentes do conteúdo de água do perfil, e requer suprimento de água suficiente para manter pelo menos uma fina lâmina de água na superfície do solo. A capacidade de infiltração é uma propriedade do solo que representa a taxa máxima que o solo pode absorver a água da chuva, em dada condição e tempo. Por ocasião de uma chuva ou irrigação, a taxa de infiltração é máxima no início do evento, e decresce rapidamente de acordo com as condições do solo. Por conseguinte, se aproxima gradualmente de um valor mínimo constante. Quantitativamente, a infiltração é caracterizada pela taxa de infiltração ( $i$ ,  $\text{cm min}^{-1}$ ), que representa o volume de água ( $V$ ,  $\text{cm}^3$ ) que passa pela área de solo ( $A$ ,  $\text{cm}^2$ ) no intervalo de tempo ( $t$ ,  $\text{min}$ ) e pela infiltração acumulada ( $I$ ,  $\text{cm}$ ) (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O solo, por possuir elevada variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos ao longo do seu perfil, muitas vezes tem o processo de infiltração interferido por alguns fatores, dentre os quais destacam-se: as condições da superfície do solo, o conteúdo inicial de água no perfil do solo, o tempo de infiltração, a existência de camadas menos permeáveis ao longo do perfil, a topografia do terreno e as propriedades físicas do solo (SHAH, 2015).

Abdelkadir et al. (2011) utilizaram o total de 81 amostras de solo para encontrar os parâmetros que afetam as propriedades de infiltração de solo. Os resultados mostraram que

a taxa de infiltração era 57% menor em terras abertas de pastoreio e cultivadas do que em solo de pastoreio controlado. Assim, há elevado potencial de escoamento superficial, percolação limitada e baixa umidade nos perfis do solo. Os fatores responsáveis por essas características foram compactação da superfície do solo, maior densidade e carbono orgânico do solo.

Ainda, Scherpinskiet al. (2009) consideram que áreas cultivadas com intensa produção agrícola tendem a apresentar alterações espaciais e temporais nos atributos físico-hídricos do solo, de modo que a viabilidade econômica da produção agrícola dependa desses atributos. Tais informações requerem, conseqüentemente, estudos detalhados sobre a variabilidade espacial do solo. Antoneli & Thomaz (2009) salientam que a elevada variabilidade das propriedades físicas do solo, como o conteúdo de areia, argila e silte e a densidade resultam em alta variabilidade nas características de retenção de água pelo solo. Contudo, a dependência espacial da taxa de infiltração de água no solo é atribuída não apenas a processos de formação do solo, mas também a seus sistemas de manejo (MIGUEL et al., 2010).

Fatores geomorfológicos, especialmente vinculados ao relevo, também afetam a dinâmica da infiltração. A forma da encosta (declive) estabelece áreas de convergência e divergência de fluxos (BOTELHO & SILVA, 2004), instaurando pontos de maior ou menor infiltração (SHOENEGER & WYSOCKI, 2005). A quantidade e a intensidade de insolação recebida tende a influenciar a evaporação e, por conseguinte, a infiltração (DE MORAIS, 2012), pois quanto maior a disponibilidade de chuvas (via evaporação), maior a intensidade da precipitação, mais rapidamente o solo atingirá a condição saturada e passará a conduzir água em profundidade, fenômeno denominado condutividade hidráulica do solo.

O processo de infiltração da água no solo também está ligado às condições antecedentes, de cobertura do solo, umidade, frequência e intensidade de chuvas (MONTENEGRO et al., 2013).

Bagarello; Iovino; Elrick (2004) apontam a umidade do solo como um dos fatores mais relevantes na estimativa da sua condutividade hidráulica dos solos. Nunes et al. (2012) observaram taxas iniciais de infiltração superiores em solos com menores taxas de umidade.

Panachuki et al. (2011) apontam a variação de umidade inicial do solo como um dos fatores que favoreceram a ocorrência da expressiva diferença entre os intervalos de tempo para início do escoamento superficial de água no solo. De acordo com os autores, alguns testes foram conduzidos em um período bastante seco, enquanto outros foram realizados após um período chuvoso. Isso proporcionou maior umidade ao solo, e, neste caso, é menor o tempo de início de escoamento superficial.

Prando et al. (2010) avaliaram a infiltração de água em um Nitossolo Vermelho distrófico, com três sistemas de rotação de culturas sob semeadura direta com e sem escarificação inicial e constataram que a taxa de infiltração de água no solo foi maior nos

tratamentos com escarificação inicial, quando comparada aos mesmos tratamentos sem escarificação. Os autores atribuem esse comportamento ao aumento da densidade do solo na superfície, devido às pressões exercidas pelos veículos em condições de umidade elevada.

### **3.2 Métodos de determinação da taxa de infiltração**

Os principais métodos apontados por Pott & De Maria (2003) são os infiltrômetros de aspersão ou simuladores de chuva, os permeâmetros, os infiltrômetros de tensão ou permeâmetros de disco e os infiltrômetros de pressão. As técnicas que simulam o impacto da gota de chuva no solo são mais indicadas para avaliação de infiltração em solos mais susceptíveis à erosão, para que se evitem problemas no dimensionamento de projetos de irrigação e drenagem bem como o subdimensionamento de projetos conservacionistas (POTT & DE MARIA, 2003).

Para uma estimativa precisa, que atendesse à definição de infiltração, a carga hidráulica do infiltrômetro deveria ser zero (pressão atmosférica). Na prática, as condições para esta estimativa poderiam ser obtidas com o uso de um simulador de chuva. No entanto, esse aparelho apresenta elevado custo de aquisição e operacionalidade mais complexa, uma vez que necessita de pressão de serviço para funcionamento dos aspersores e nem sempre se dispõe dessa condição em campo (SIMÕES, 2005).

Fagundes et al. (2012) destacam o método do infiltrômetro de cilindro para a determinação das características hidrodinâmicas do solo, relacionadas com a infiltração. Os autores justificam o uso da técnica pela sua simplicidade, fácil execução e baixo custo.

Alguns erros podem existir na determinação da infiltração de água no solo devido ao fluxo lateral de água no solo abaixo do infiltrômetro. Segundo Haise et al. (1956), citados por Skaggs et al. (1983), uma forma de evitar esses erros é utilizar infiltrômetro de cilindros concêntricos IAC, cujo cilindro externo tem a função de evitar o fluxo lateral da água no solo. Entretanto, Bouwer (1986) discorda da necessidade de um cilindro externo e afirma que a única forma de se medir a infiltração vertical de um solo é pela utilização de cilindros com diâmetros suficientemente grandes, de maneira que a relação entre a pressão de entrada de ar do solo e o diâmetro do cilindro seja praticamente nula.

Assim, Pott & De Maria (2003) apontam a necessidade de investigar as formas de determinação da taxa de infiltração, também conhecida como taxa de infiltração estável e suas interações com os diferentes tipos de solo, uma vez que os métodos podem ser influenciados pelos atributos do solo.

Diversos estudos vêm utilizando o infiltrômetro de cilindro único, principalmente devido à sua praticidade. Esta técnica utiliza um cilindro de metal de pequeno raio, que é

inserido no solo a uma profundidade rasa. Uma carga hidráulica constante,  $H$ , é estabelecida dentro do cilindro de infiltração e a variação da lâmina d'água na superfície é monitorada (BAGARELLO; IOVINO; LAI, 2016). O fluxo passa por uma fase decrescente inicial e então se aproxima das condições de estado estacionário (REYNOLDS; ELRICK, 1990).

Merriam et al. (1983) recomendavam a utilização de infiltrômetro de cilindro único (ICU) na determinação da infiltração vertical desde que ele tivesse, no mínimo, 0,25 m de diâmetro e que fosse instalado a, pelo menos, 0,15 m abaixo da superfície do solo.

Bagarello & Sgroi (2004) avaliaram as alterações temporais da condutividade hidráulica saturada em solo de superfície utilizando um infiltrômetro de cilindro único e sugeriram que a utilização de cilindros de grandes diâmetros, pois são mais efetivos na redução de efeitos de borda e perturbação do volume de solo amostrado.

Chowdary, Rao e Jaiswal (2006) compararam infiltrômetros de cilindro único de 0,1, 0,15, 0,2, 0,25 e 0,3m de diâmetro de 0,06, 0,13, 0,16, 0,2, 0,26m de comprimento, com 0,07, 0,1 e 0,3 m de profundidade de penetração, com infiltrômetros de cilindro duplo com combinação de 0,1-0,35 e 0,35 - 0,6 m com penetração de 0,07 m de profundidade. Os autores concluíram que o componente de molhamento lateral variou de 31,8 a 67,9% no caso de infiltrômetros de cilindro único e 11,7-11,92% para o caso de infiltrômetro de cilindro duplo com 0,07m de profundidade de penetração.

Entretanto, Youngs (1987) realizaram experimentos para avaliar infiltrômetros de raios 0,455, 0,304, 0,152, 0,091, 0,049, 0,024 e 0,01 m e concluíram que os resultados dos ensaios eram consistentes com os cilindros maiores que 0,15 m.

Bouwer et.al (1999) afirmam que a taxa do método permite um grande número de medições para avaliar a ampla variabilidade espacial nos solos. Os autores realizaram mais de 300 testes com o infiltrômetro de cilindro único e os dados indicaram que o procedimento produz boas estimativas de taxas de infiltração em grande escala. Já o método de ensaio com infiltrômetro de cilindro duplo apresentou desempenho semelhante ao infiltrômetro de único cilindro, porém, com operação muito mais lenta e trabalhosa.

Simões, Figueiredo e Silva (2005), ao testarem um infiltrômetro de cilindro único (ICU) com 0,20 m de diâmetro e 0,50 m de altura, concluíram que é possível estimar a taxa de infiltração, utilizando-se de ICU com a carga hidráulica desejada, desde que, para isso, se aplique um fator de correção, o qual depende do tipo de solo em estudo.

Reynolds & Elrick (1990) desenvolveram um modelo para o fluxo de água no estado estacionário a partir de um infiltrômetro de cilindro único usando a função hidráulica e um fator de forma que contabiliza vários raios e profundidade de inserção. Consideraram o processo de infiltração de um único cilindro como um problema tridimensional (3-D). As vantagens deste método de cilindro único incluem a baixa sensibilidade do cálculo de condutividade hidráulica saturada a erros no coeficiente de forma; erros de medição

reduzidos, resultantes da variabilidade do solo em pequena escala e a capacidade de possibilidade de aumentar as taxas de fluxo em materiais de baixa permeabilidade.

Wu & Pan (1997) estudaram a taxa de infiltração para um infiltrômetro de cilindro único a partir de uma técnica de escala que envolve condutividade hidráulica saturada, profundidade de inserção de cilindro, profundidade de ponta e diâmetro do cilindro e desenvolveram uma curva de infiltração generalizada para infiltrômetros de cilindro único, e modificaram o método de Reynolds & Elrick (1990) para a inserção das funções hidráulicas de Van Genuchten (1980).

Embora estudos corroborem a eficiência do uso do infiltrômetro de cilindro único, como alternativa para estimativa da taxa de infiltração da água no solo bem como estimem modelos e coeficientes para ajustes nas medições, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América alerta que a realização de apenas uma medição com o infiltrômetro de único cilindro consiste apenas em uma medida aproximada, por isso recomenda que múltiplos pontos amostrais sejam testados. Além disso, recomendam que o teste não seja conduzido quando o solo superficial estiver excepcionalmente seco (USDA, 1994).

### **3.3 Infiltração em Latossolo**

Latossolos são formados pelo processo denominado latolização, que consiste na remoção da sílica e das bases do perfil após a transformação dos minerais primários constituintes. São solos minerais, não-hidromórficos, profundos (normalmente superiores a 2 metros), horizontes B muito espessos (> 50 cm), com sequência de horizontes A, B e C pouco diferenciados. As cores variam de vermelhas muito escuras a amareladas, geralmente, escuras no A, vivas no B e mais claras no C. Possuem aspecto maciço poroso; apresentam estrutura granular muito pequena; são macios quando secos e altamente friáveis quando úmidos.

Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes para as plantas, representados normalmente por sua baixa capacidade de troca de cátions. Mais de 95% dos latossolos são distróficos e ácidos, com pH entre 4,0 e 5,5 e teores de fósforo disponível extremamente baixos, quase sempre inferiores a  $1\text{mgdm}^{-3}$ . Em geral, são solos com grandes problemas de fertilidade (SOUZA & LOBATO, 2016).

Trata-se da principal classe de solo encontrada no Paraná, sendo distribuído em 31% do território estadual. Na região Oeste, o solo de tem origem basáltica e é a classe mais frequente (LIMA; LIMA; MELO, 2012).

A condutividade hidráulica e conseqüentemente a taxa de infiltração são fatores dependentes da porosidade do solo, que podem variar muito de uma classe de solo para



outra e, inclusive, na mesma classe (REICHARDT & TIMM, 2012). Nos Latossolos, em condições normais, a infiltração de água é geralmente elevada, porém, pode ser diminuída quando ocorrem camadas compactadas em função da redução da macroporosidade (SECCOII et al., 2011).

Sidiras & Roth (1984), utilizando cilindros concêntricos, determinaram a taxa básica de infiltração de um Latossolo-Roxo Distrófico em  $129 \text{ mm h}^{-1}$ . Pott & De Maria (2003) estimaram a taxa de infiltração básica (ou taxa de infiltração estável) em um Latossolo textura argilosa e em Latossolo textura média argilosa. Os autores utilizaram infiltrômetros de aspersão, de pressão e permeâmetro. Os autores verificaram que o movimento de água foi governado pela estrutura do solo e, no infiltrômetro de aspersão, no qual é considerado o impacto das gotas de chuva, o processo de infiltração foi regido principalmente pela taxa de cobertura do solo e pelas características granulométricas. Os valores de taxa básica de infiltração encontrados pelos autores variaram de  $61,2$  até  $442,2 \text{ mm h}^{-1}$  para Latossolos de textura argilosa, e de  $85,6$  até  $211,6 \text{ mm.h}^{-1}$  para Latossolo de textura médio argilosa.

Cunha et al. (2009) avaliaram a taxa de infiltração de água em um Latossolo Amarelo, utilizando a infiltrômetro de cilindro único, e obtiveram a taxa de infiltração básica de  $163,2 \text{ mm h}^{-1}$ . Nunes et al. (2012) utilizaram infiltrômetro de cilindros concêntricos em latossolo vermelho de cerrado, com textura média, e determinaram que a taxa de infiltração básica foi de  $40,8 \text{ mm h}^{-1}$ .

Mioranza et al. (2015) avaliaram as modificações na porosidade do solo (macro e microporos) e condutividade hidráulica saturada, em um Latossolo argiloso submetido a diferentes níveis de compactação, induzidas pela intensidade de tráfego de um trator. Os autores concluíram que o solo se encontrava em boas condições físicas (com macroporosidade próxima do estado físico ideal de 15%), cuja taxa de infiltração foi reduzida conforme procedeu-se o tráfego. As consequências desse processo foram a alteração do estado estrutural do solo e menores taxas de condutividade hidráulica saturada.

Drescher et al. (2016) avaliaram a taxa de infiltração de água no solo em Latossolo Vermelho distrófico típico, com infiltrômetro de cilindros concêntricos, com diâmetros de  $0,20$  e  $0,40 \text{ m}$  para cilindro interno e externo, respectivamente. A última leitura da taxa de infiltração foi considerada estável (TIE) às duas horas do ensaio. Os tratamentos avaliados foram sistema de plantio direto escarificado mecanicamente há  $0, 6, 12, 18, 24, 30$  e  $36$  meses e um sistema de plantio direto manejado continuamente há  $27$  anos sem revolvimento. Em relação ao tratamento  $0$  meses, para o sistema de plantio direto sem revolvimento, os autores observaram decréscimo de cerca de  $600 \text{ mm h}^{-1}$ , para menos de  $100 \text{ mm h}^{-1}$  na taxa de infiltração estável em função do tempo em que a escarificação foi realizada.

### 3.4 Controle estatístico de processo aplicado à infiltração de água no solo

O Controle estatístico do processo (CEP) é um conjunto de técnicas, desenvolvido inicialmente para avaliação da produção industrial, com o intuito de evitar a variação entre os produtos. De acordo com Montgomery (2009), a variação dos produtos implica aumento de custos e de tempo de processo. Nesse contexto, o autor aponta o controle estatístico de processos como um conjunto de ferramentas úteis para avaliação e redução da variabilidade na produção.

Um das principais ferramentas desta estatística são os Gráficos de Shewhart. Nesta ferramenta, as amostras individuais ou o valor médio de um grupo de observações de um processo são comparadas aos valores de limites permissíveis de variação (limites de controle) e com um valor alvo (KLEIN et al., 2012). O gráfico de controle de Shewhart é uma regra de decisão estatística, com base nas observações de um processo para determinar se a característica de qualidade desejada desviou-se do seu valor alvo ao longo do tempo (MONTGOMERY, 2009). Frigo et al. (2016) apontam o gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais como a ferramenta mais utilizada, devido a sua simplicidade e facilidade de construção e interpretação.

De acordo com Nezhadet al. (2009), a variação que estabelece os limites de controle é determinada por mais ou menos três vezes o desvio padrão, também denominado sigma. Quando os dados se apresentam fora dos limites estabelecidos com este critério, os autores sugerem a investigação do processo.

Além dos gráficos de controle, a análise da capacidade de um processo é uma avaliação que pode ser utilizada para avaliar a variabilidade ao longo do tempo do processo. O índice de Capacidade de um Processo é um parâmetro adimensional que indiretamente mensura o quanto um processo consegue atender às especificações. Assim, quanto maior é o seu valor, melhor o processo atende às exigências (MONTGOMERY, 2009).

Embora tenha surgido em bases industriais, há algum tempo o controle estatístico de processo vem sendo aplicado em diversos processos agrícolas. Muitos autores vêm empregando os gráficos de controle na avaliação da uniformidade da irrigação, bem como na avaliação dos parâmetros que influenciam no seu desempenho (ZHOU et al., 2008; JUSTI, VILAS BOAS, SAMPAIO, 2010; REIS et al., 2011; ALBIERO et al., 2012; BORSSOI et al., 2012; KLEIN et al., 2012; FRIGO et al., 2013; KLEIN et al., 2013; DIETER et al., 2014; KLEIN et al., 2015; HERMES et al., 2015; FRIGO et al., 2016)

Outros exemplos de aplicação destas ferramentas de controle são a avaliação da instrumentação de barragem (LAZZAROTTO et al., 2015), o monitoramento da qualidade da água (KAISER-HILLCOMPANY, 2004), a avaliação de tratamento de esgoto doméstico (ORSSATTO et al., 2014), o preparo de solo e manejo de culturas (LOPES et al., 1995;

MILAN; FERNANDES, 2002; SILVA et al., 2014; SILVA; CUNHA; NOMELINI, 2016), além do monitoramento de parâmetros físico-químicos do solo (CHOU, 2004; SONCELA et al., 2011; CRUZ; FILHO; FALCÃO, 2014).

Nesse contexto, a utilização dessas ferramentas de controle estatístico de processo para a avaliação das estimativas de infiltração, por infiltrômetros de cilindro único com diferentes diâmetros, além de representarem avanço na utilização de técnicas de controle estatístico de processo em mais uma área da engenharia agrícola, configuram uma alternativa que forneceria respostas em relação à confiabilidade e à variabilidade dos dados obtidos pela utilização desses equipamentos.

### **3.5 Interpolação de dados de infiltração de água no solo**

Interpolação espacial é o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos. Esse processo pode ser aplicado às diversas informações voltadas ao manejo agrícola, em especial ao manejo do solo. Considerando-se a distribuição espacial das informações de atributos do solo como uma das bases da agricultura de precisão, é muito importante estimar estes dados em diversos contextos, os quais estão muitas vezes ligados à adoção do manejo diferenciado em áreas heterogêneas (SOUZA et al., 2010; QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017).

Diversos autores abordam a distribuição espacial dos dados e sua relevância no planejamento agrícola, com relação à instalação e ao manejo das culturas (SILVA et al., 2008), aos atributos químicos e à variabilidade espacial da fertilidade do solo, à identificação de zonas de manejo (SOUZA et al., 2008), além da análise ambiental e de bacias hidrográficas e à avaliação de suas fontes potenciais de degradação (GOMES et al., 2007).

Os mapas de distribuição espacial são gerados a partir de modelagem matemática por métodos de interpolação, ou seja, estimam-se valores para locais não amostrados, a partir de determinado número de pontos observados em campo (SOUZA et al., 2010).

Os principais métodos de interpolação utilizados são a krigagem e inverso do quadrado da distância. A krigagem utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (CARVALHO & ASSAD, 2005).

O método do inverso da potência das distâncias é um procedimento para estimação ou interpolação determinista (por oposição a um processo estocástico) com base em um conjunto de dados separados no espaço. As localizações de valor desconhecido são calculadas em função de uma média ponderada pelos inversos das distâncias dessa mesma localização à localização de valores conhecidos (regra geral os dados reais). A Ponderação é atribuída aos pontos amostrais através da utilização de um coeficiente de ponderação que

controla como a influência da ponderação diminuirá à medida que a distância aumenta a partir do ponto desconhecido. Em sistemas de informação geográfica (SIG), a interpolação usualmente resulta em uma camada raster bidimensional, ou seja, uma imagem (SOARES, 2006; QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017).

Couto et al. (2002) afirmam que ambos os métodos são indicados na inferência de dados, dependendo dos atributos a serem estimados e podem apresentar resultados semelhantes à krigagem. Souza et al. (2010) compararam a eficiência da interpolação de dados regionalizados por krigagem ordinária e do inverso do quadrado da distância na estimativa de atributos químicos em um Argissolo Vermelho-Amarelo e concluíram que os métodos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Vieira et al. (1981) verificaram que a taxa de infiltração de água no solo é um parâmetro com alta variabilidade espacial, cuja dependência pode ser atribuída ao manejo e às características pedogênicas. Assim, a análise da variabilidade espacial da taxa de infiltração de água pode subsidiar o planejamento do manejo de áreas agrícolas, permitir o conhecimento da estrutura espacial e temporal das variáveis bem como estimar os valores de variáveis correlacionadas (MIGUEL; VIEIRA; GREGO, 2009).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

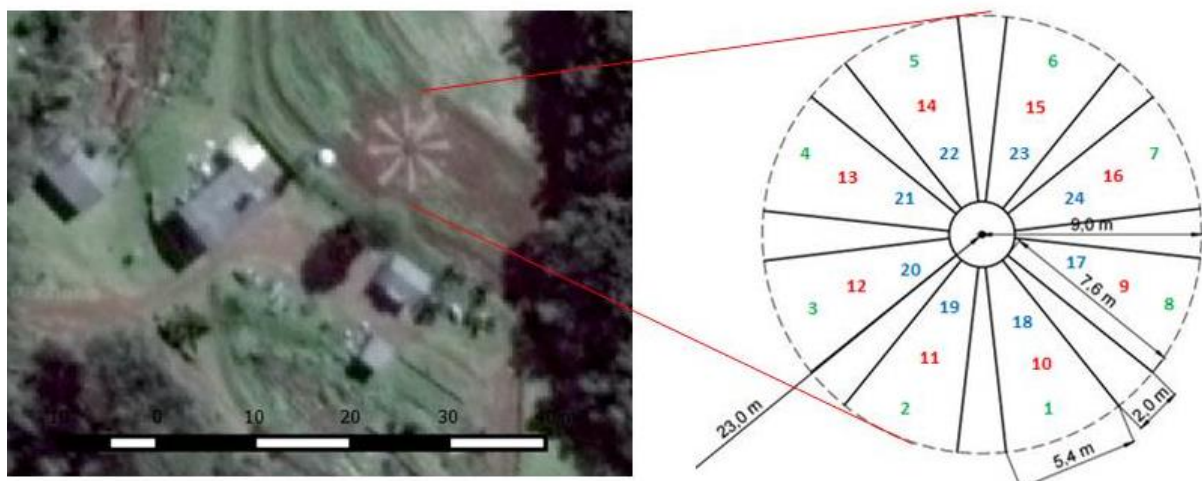
Este capítulo diz respeito à descrição da coleta e preparação do material, das determinações físicas realizadas e do procedimento experimental adotado. Além de descrever a análise estatística utilizada.

### 4.1 Localização e caracterização experimental

O trabalho foi desenvolvido no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola – NEEA, pertencente à UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizado na BR 467, km 101, na cidade de Cascavel, cujas coordenadas geográficas são 24° 54' 148" latitude Sul, 53° 31' 57" longitude Oeste e a altitude de 750 m. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é o subtropical úmido – Cfa. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico Típico, com relevo suave a ondulado e textura muito argilosa. As frações texturais presentes no solo da área experimental são 12,6% areia, 19,5% silte e 67,9% argila (BREMM, 2005).

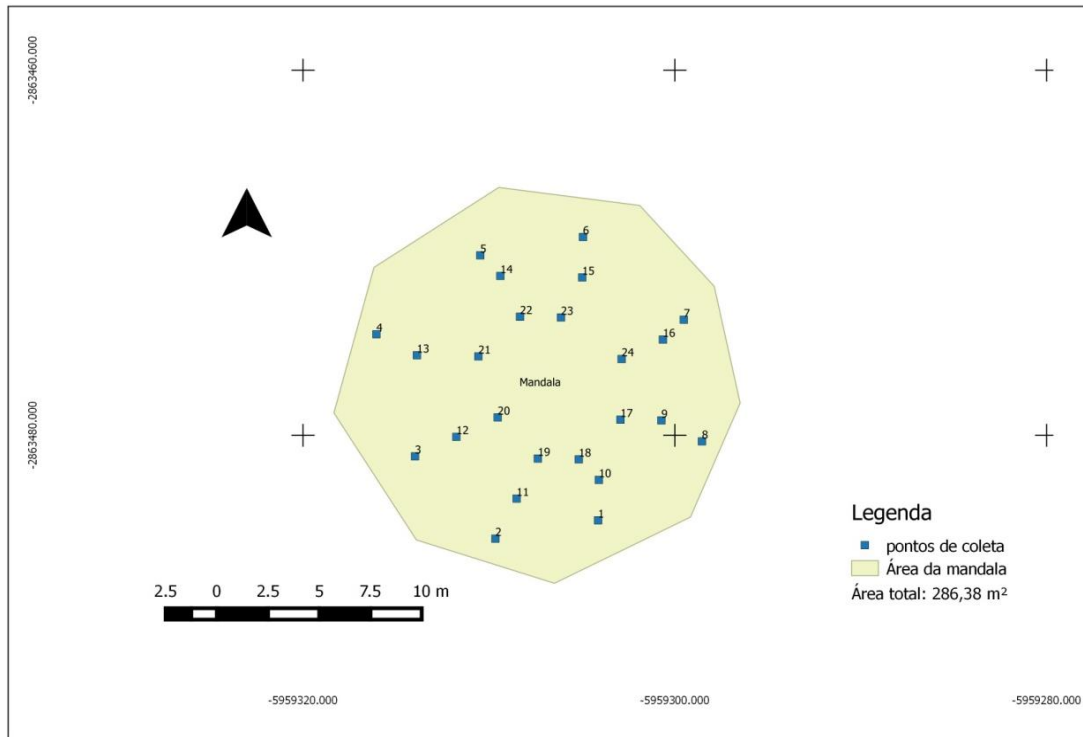
O trabalho foi realizado no período de maio a setembro de 2016. A área experimental vinha sendo cultivada nos anos anteriores em sistema de plantio direto com alternância das culturas de soja e milho, porém sem regularidade.

Vinte e quatro pontos amostrais foram demarcados na área experimental, os quais foram alocados em oito (8) parcelas de um talhão circular, denominado mandala, preparado para plantio em regime de permacultura, com declividade de 18,83% no sentido sudoeste. No momento da coleta dos dados, o solo estava exposto. Os pontos foram registrados com um GPS de navegação modelo e-Trax da marca Garmin (Figura 1).



**Figura 1** Croqui da área experimental e pontos de coleta de dados, numerados de 1 a 24.

Elaborou-se um mapa georreferenciado com os dados coletados no campo e calculou-se a área da mandala utilizando-se o software livre QuantunGis, versão 2.8 (Figura 2).



**Figura 2** Mapa georreferenciado da mandala e dos pontos de coleta.

#### 4.2 Coleta de amostras de solo para estimativa de umidade do solo

A umidade do solo foi estimada pelo método gravimétrico, descrito pela Embrapa (1997), utilizando-se amostras de solo deformadas, retiradas nas camadas superficiais do solo, até 0,1 m de profundidade. As amostras foram coletadas utilizando-se enxada reta, antes e depois dos ensaios de infiltração. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos do tipo auto-vedantes (Ziplock) e levadas diretamente ao laboratório, onde foram pesadas e secas a 105 °C em estufa com circulação contínua, até que seu peso se estabilizasse.

#### 4.3 Coleta de amostras de solo para estimativa da densidade aparente

A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico Embrapa (2005). Para cada ponto amostral, foram realizadas duas coletas utilizando-se cilindros metálicos com 50,8 mm de diâmetro externo, 48,20 mm de diâmetro interno por 47,20 mm de altura. O volume dos cilindros foi previamente calculado com base na média de três medidas de diâmetro interno e externo e de altura, realizadas com paquímetro.

As amostras foram encaminhadas para estufa a 105 °C e, após 24 e 48 horas foram retiradas e postas para esfriar. Após atingir a temperatura ambiente, as amostras foram pesadas novamente. A razão entre o peso da amostra seca a 105 °C e o volume dos cilindros é a densidade aparente expressa pela Equação 1.

$$D_a = \frac{a}{b} \quad (1)$$

Em que,

$D_a$ – Densidade aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$a$ – peso da amostra seca a 105 °C;

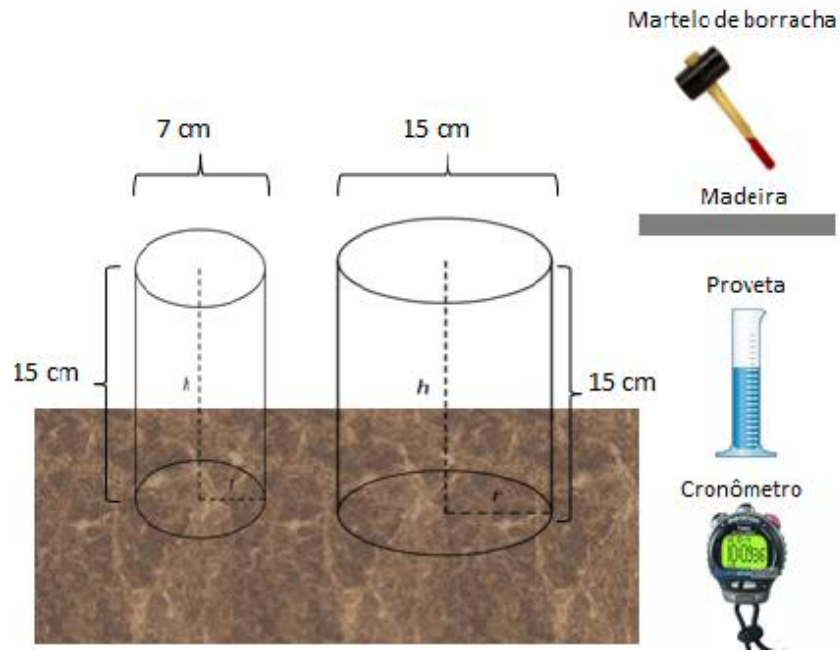
$b$ – volume da proveta.

Os equipamentos e instrumentos utilizados foram disponibilizados pelo Laboratório de solos da UNIOESTE, campus de Cascavel.

#### 4.4 Infiltração da água com cilindro único

Dois cilindros metálicos foram utilizados, separadamente, para o teste com o infiltrômetro de cilindro único. Um com diâmetro de 15 cm (A15) e o outro com diâmetro de 7 cm (A7), ambos com altura de 15 cm (Figura 3). Os cilindros foram cravados no solo até 10 cm de profundidade com auxílio de um martelo de borracha e nivelados de acordo com as recomendações de Bernardo (1986). Três ensaios de infiltração foram realizados para cada uma das oito parcelas, totalizando 24 ensaios.

Posteriormente, com auxílio de uma proveta, foi inserido o volume de 400 ml de água para o A15 e 180 ml de água para o A7, resultando em lâminas de 26,0 e 46,8 mm, respectivamente. O volume de água utilizado foi calculado de acordo com o volume suportado pelos cilindros a fim de que não ocorresse o transbordamento de água durante a realização dos testes, de acordo com o método descrito por Lassabatè et al. (2006) e adaptado por Xu et al. (2012).



**Figura 3** Cilindro metálico para o teste de infiltração e materiais de utilização.

O tempo para que a água infiltrasse por completo foi contabilizado com auxílio de um cronômetro. O procedimento foi repetido até que a taxa de infiltração observada nos cilindros se tornasse constante com o tempo. O tempo acumulado e o intervalo de tempo entre colocar um volume de água e outro foram contabilizados, juntamente com os valores da lâmina de infiltração.

A lâmina de infiltração foi calculada, em mm, com o volume de água colocado no infiltrômetro, de acordo com a Equação 2.

$$I \text{ (mm)} = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Em que:

$I$  – Lâmina de infiltração;

$V$  – volume de água em litros;

$A$  – área do cilindro em  $m^2$ .

As taxas de infiltração foram calculadas de acordo com a Equação 3.

$$Ti = \frac{I \text{ (mm)}}{\Delta t \text{ (h)}} \quad (3)$$

Em que:

$Ti$  – taxa de infiltração;



$I$  – lâmina de infiltração;

$\Delta_t$  – intervalo de tempo.

Os dados de infiltração foram plotados em um gráfico, no qual o eixo das abscissas representa o tempo acumulado e o eixo das ordenadas representa a taxa de infiltração.

#### 4.5 Análise estatística

Para avaliação dos dados, procedeu-se a análise estatística exploratória utilizando-se o software Minitab, versão 17. Além disso, compararam-se os resultados obtidos com os cilindros pela análise de variâncias, utilizando-se, para tanto, significância de 5%. Avaliaram-se a relação entre as taxas de infiltração estável e os dados de umidade inicial e a densidade aparente do solo pelo ajuste de equações por regressão linear e não linear. As curvas de infiltração foram ajustadas por regressão dos dados de infiltração associados aos dados de tempo acumulado.

Avaliou-se a conformidade do uso dos cilindros para os ensaios de infiltração utilizando-se gráficos de Controle de Shewhart individuais. Além disso, os parâmetros umidade e densidade do solo foram também submetidos a esta análise.

Os limites inferior e superior dos gráficos de Controle de Shewhart para medidas individuais foram calculados a partir da Equação 4. Quando o limite inferior foi estimado em valores negativos, utilizou-se limite inferior igual a zero.

$$LC = \bar{X} \mp 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (4)$$

Em que:

LC - Limites inferior e superior de controle;

$\bar{X}$  - Média dos dados;

$\overline{MR}$  - Média da amplitude móvel dos dados;

$d_2$  - Constante quando usada uma amplitude móvel de  $n = 2$  observações (MONTGOMERY, 2009).

O índice de capacidade de processo foi estimado utilizando-se a metodologia descrita por Montgomery (2009), pela Equação 5.

$$Cp = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad (5)$$

Em que:

- $C_p$ : Índice de capacidade do processo;  
 LSC: Limite superior de controle;  
 LIC: Limite inferior de controle;  
 $\sigma$ : Desvio padrão populacional da variável em estudo.

A capacidade de processo pelo limite inferior foi estimada pela Equação 6. O limite inferior utilizado na estimativa foi zero e o limite superior foi definido em  $600 \text{ mm h}^{-1}$  com base nos resultados de taxa de infiltração estável, obtida para Latossolos, exposto em área recém preparada para plantio por Drescher et al. (2016).

$$C_{pi} = \frac{\bar{x} - LIC}{3\sigma} \quad (6)$$

Em que:

- $C_{pi}$ : Capacidade do processo pelo limite inferior;  
 $\bar{x}$ : Média dos dados;  
 LIC: Limite inferior de controle;  
 $\sigma$ : Desvio padrão populacional

#### 4.6 Interpolação e mapas de distribuição espacial

O software livre Qgis, versão 2.8, foi utilizado na confecção dos mapas de distribuição dos dados de taxa de infiltração, umidade e densidade do solo. A interpolação entre os 24 pontos coletados foi realizada pelo método do inverso do quadrado da distância descrito na Equação 7, a seguir.

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \cdot x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (7)$$

Em que:

- $X_p$  - variável interpolada;  
 $x_i$  - valor da variável da  $i$ -ésima localidade vizinha;  
 $d_i$  - distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Curvas de Infiltração

Avaliaram-se as curvas de infiltração geradas a partir dos dados coletados com os cilindros A7 e A15, para os 24 pontos de coleta. Realizou-se o ajuste a partir das equações potenciais, seguindo o modelo de Kostiakov descrito por Castro & Souza (1999). Nesse modelo, a variável dependente é a taxa de infiltração ( $T_i$ ) e a variável independente é o tempo ( $T$ ).

Na Tabela 1, observou-se que os coeficientes de determinação variaram de 67% (ponto 1) até 96% (ponto 23) para as equações do cilindro A7; e de 73% (ponto 9) até 97% (ponto 21) para o cilindro A15. O coeficiente de determinação representa quanto uma equação explica o comportamento de uma variável em função de outra e, quanto mais próxima de 1, melhor é o ajuste. Em relação aos ajustes testados, pode-se considerar, que, em geral, as equações obtidas a partir dos dados de A15 apresentaram coeficientes de determinação mais elevados, embora, para os pontos 4, 5, 9 e 23, os coeficientes das equações de A7 foram mais próximos de 1.

**Tabela 1** Curvas de infiltração ajustadas para os cilindros A7 e A15 para os 24 pontos de coleta e coeficientes de determinação. ( $T_i$  - Taxa de infiltração em  $\text{mm h}^{-1}$  e  $T$  - tempo em horas).

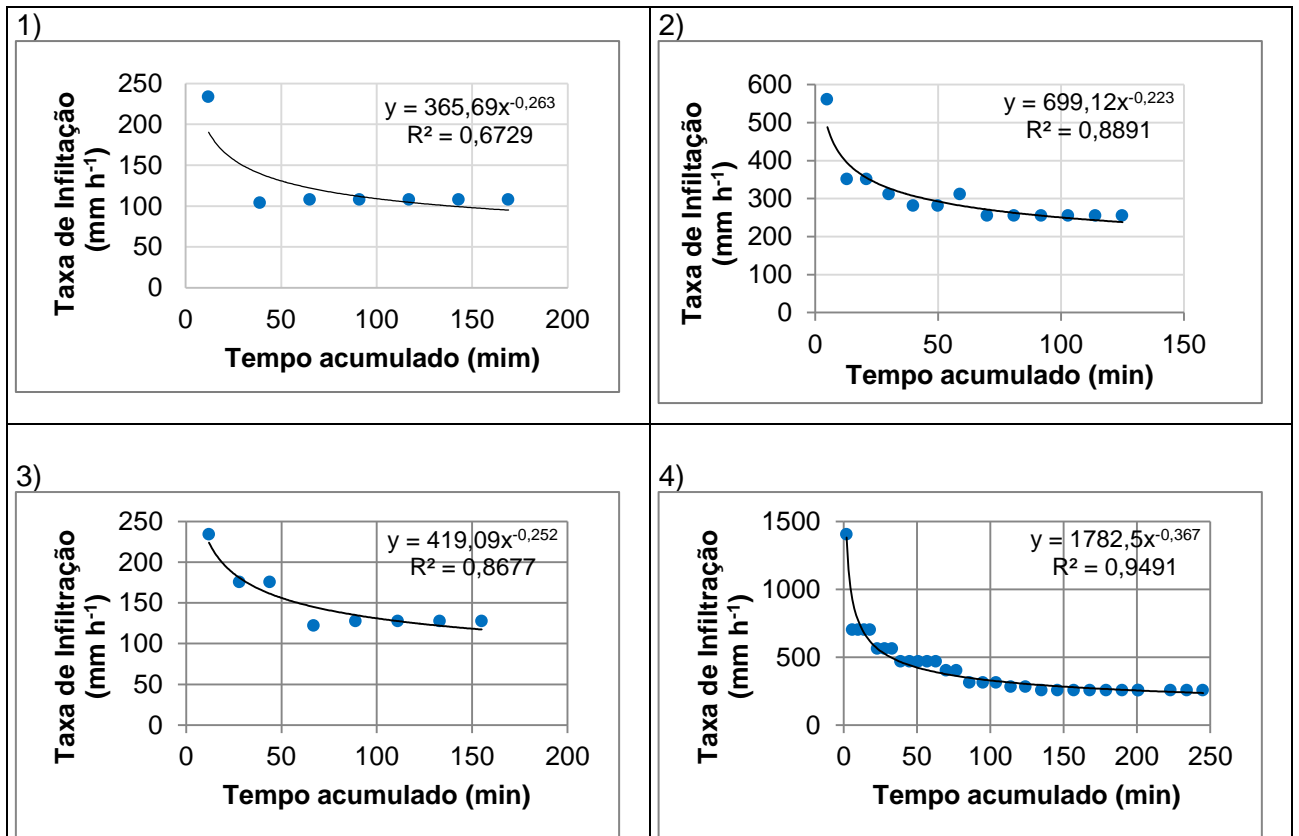
| Pontos | A7                       | R <sup>2</sup> | A15                      | R <sup>2</sup> |
|--------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| 1      | $T_i = 365,69T^{-0,263}$ | 0,6729         | $T_i = 707,48T^{-0,255}$ | 0,872          |
| 2      | $T_i = 699,12T^{-0,223}$ | 0,8891         | $T_i = 753,43T^{-0,282}$ | 0,8923         |
| 3      | $T_i = 419,09T^{-0,252}$ | 0,8677         | $T_i = 753,43T^{-0,282}$ | 0,8923         |
| 4      | $T_i = 1782,5T^{-0,367}$ | 0,9491         | $T_i = 668,21T^{-0,245}$ | 0,8705         |
| 5      | $T_i = 691,8T^{-0,373}$  | 0,9415         | $T_i = 447,78T^{-0,225}$ | 0,8517         |
| 6      | $T_i = 348,02T^{-0,222}$ | 0,7809         | $T_i = 375,8T^{-0,215}$  | 0,9449         |
| 7      | $T_i = 404,84T^{-0,258}$ | 0,8477         | $T_i = 1486,9T^{-0,462}$ | 0,8032         |
| 8      | $T_i = 561,25T^{-0,297}$ | 0,7638         | $T_i = 874,4T^{-0,304}$  | 0,8674         |
| 9      | $T_i = 298,12T^{-0,206}$ | 0,9075         | $T_i = 253,14T^{-0,088}$ | 0,7286         |
| 10     | $T_i = 2427,6T^{-0,418}$ | 0,9035         | $T_i = 1021T^{-0,342}$   | 0,9486         |
| 11     | $T_i = 1271,1T^{-0,274}$ | 0,822          | $T_i = 1359,4T^{-0,4}$   | 0,9313         |
| 12     | $T_i = 1299,3T^{-0,257}$ | 0,912          | $T_i = 1140,3T^{-0,378}$ | 0,9509         |
| 13     | $T_i = 859,37T^{-0,281}$ | 0,7272         | $T_i = 711,68T^{-0,252}$ | 0,9027         |
| 14     | $T_i = 508,23T^{-0,309}$ | 0,9106         | $T_i = 443,28T^{-0,224}$ | 0,9592         |
| 15     | $T_i = 347,98T^{-0,256}$ | 0,772          | $T_i = 739,98T^{-0,355}$ | 0,9656         |
| 16     | $T_i = 665,64T^{-0,321}$ | 0,9205         | $T_i = 418,42T^{-0,233}$ | 0,943          |
| 17     | $T_i = 704,74T^{-0,339}$ | 0,7616         | $T_i = 829,69T^{-0,379}$ | 0,9397         |
| 18     | $T_i = 1423,4T^{-0,314}$ | 0,9483         | $T_i = 923,19T^{-0,327}$ | 0,9581         |
| 19     | $T_i = 456,31T^{-0,285}$ | 0,8121         | $T_i = 865,5T^{-0,304}$  | 0,9305         |
| 20     | $T_i = 497,61T^{-0,270}$ | 0,8386         | $T_i = 344,04T^{-0,188}$ | 0,906          |
| 21     | $T_i = 379,14T^{-0,140}$ | 0,8557         | $T_i = 1413,4T^{-0,371}$ | 0,9675         |
| 22     | $T_i = 524,09T^{-0,273}$ | 0,8962         | $T_i = 463,27T^{-0,238}$ | 0,9111         |
| 23     | $T_i = 2623,4T^{-0,383}$ | 0,9593         | $T_i = 458,67T^{-0,246}$ | 0,9221         |
| 24     | $T_i = 556,3T^{-0,232}$  | 0,8177         | $T_i = 608,43T^{-0,25}$  | 0,8187         |

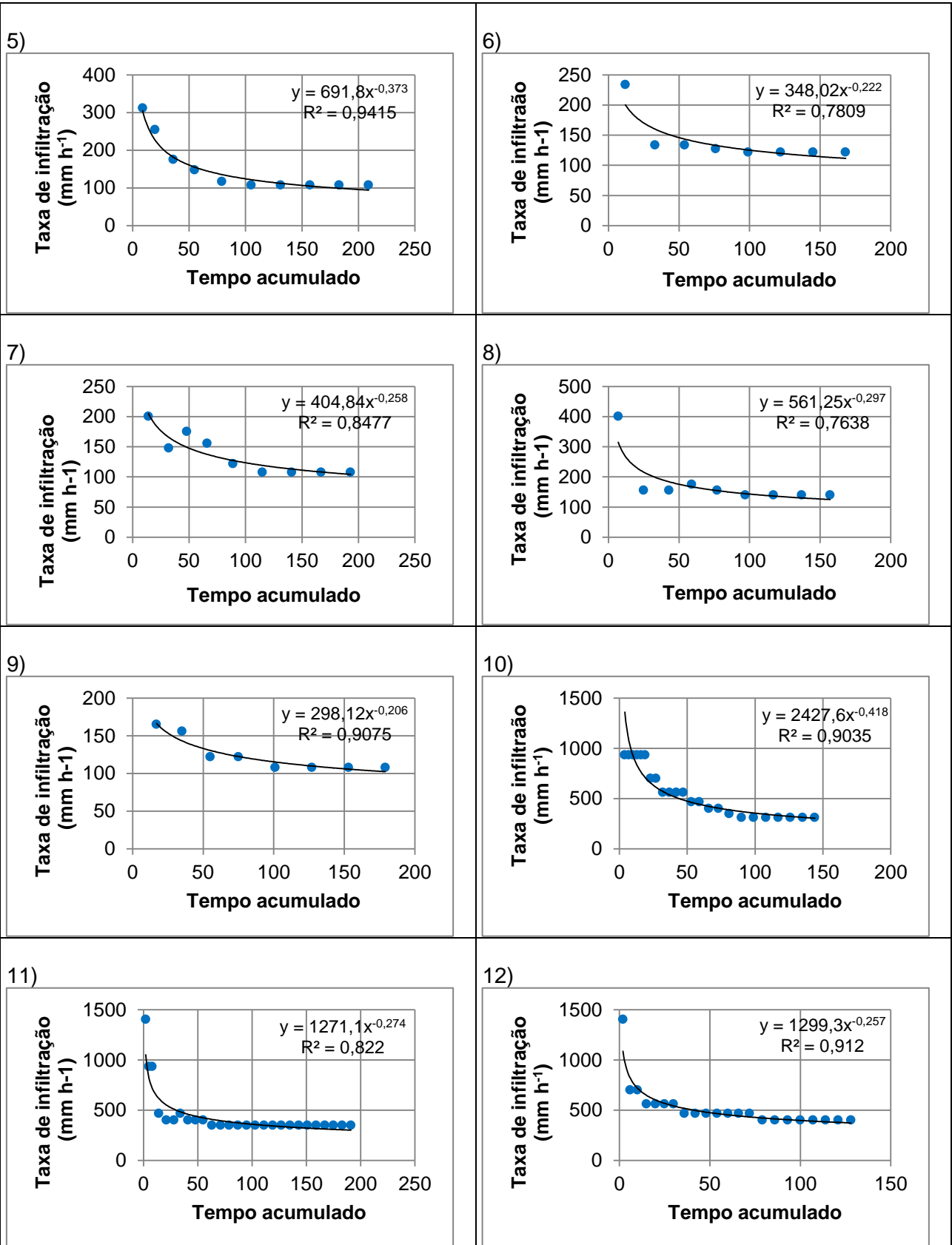
Castro & Souza (1999) ajustaram o modelo de Kostiakov-Lewis, avaliaram a influência da vazão sobre o parâmetro  $k$  da equação, e concluíram que esse parâmetro não é influenciado pela vazão, já que o coeficiente de determinação entre  $a$  e a vazão aplicada é de 0,0256. Sobrinho et al. (2003) verificaram que os ajustes para determinação da taxa de infiltração pelo modelo de Horton apresentaram coeficientes de determinação superiores aos obtidos pelo modelo Kostiakov-Lewis.

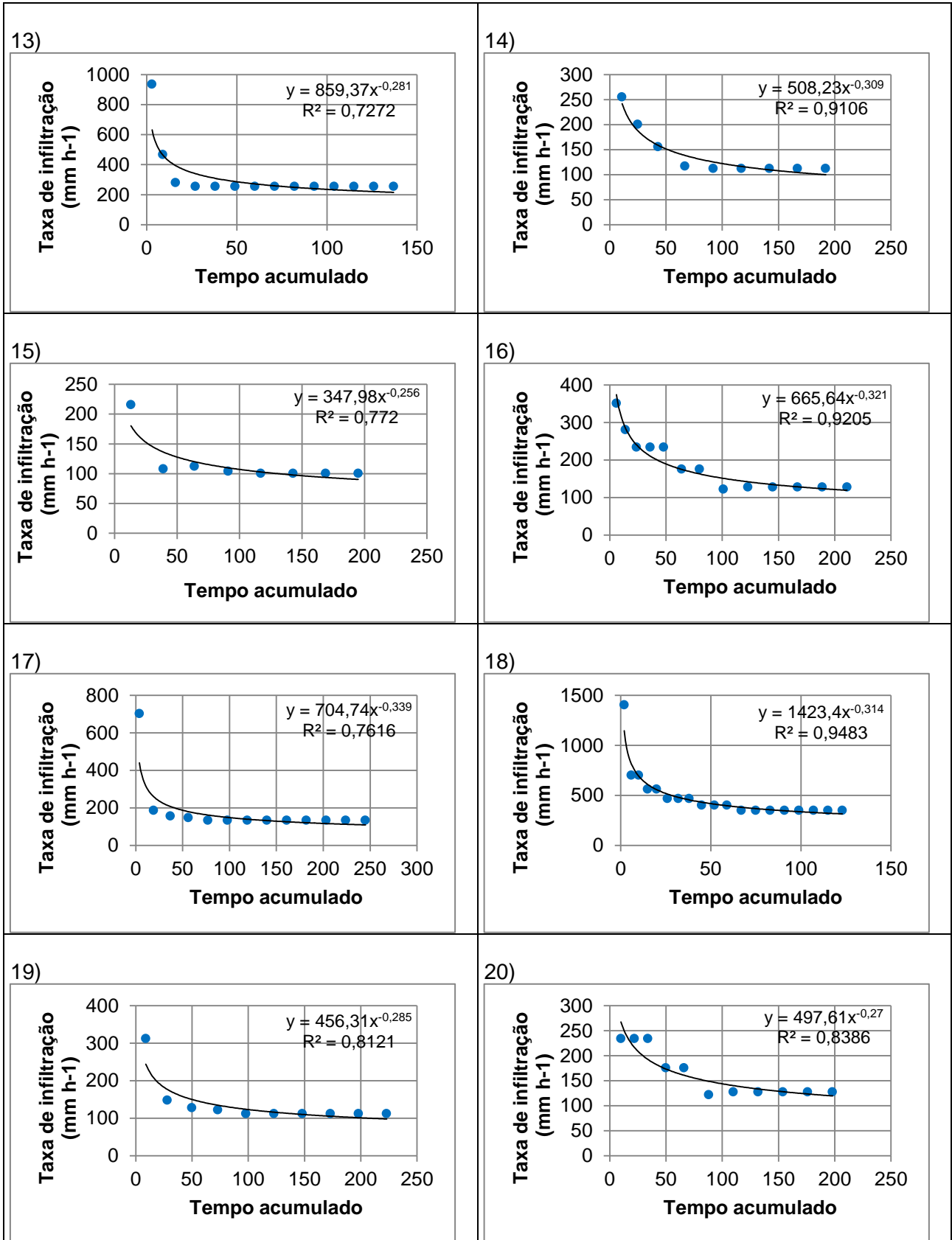
Panachuki et al. (2006) encontraram ajustes satisfatórios para estimativa da infiltração pelo modelo de Horton em relação à equação de Kostiakov-Lewis, haja vista a primeira (equação de Horton) ter apresentado valores de  $R^2$  sempre acima de 88%.

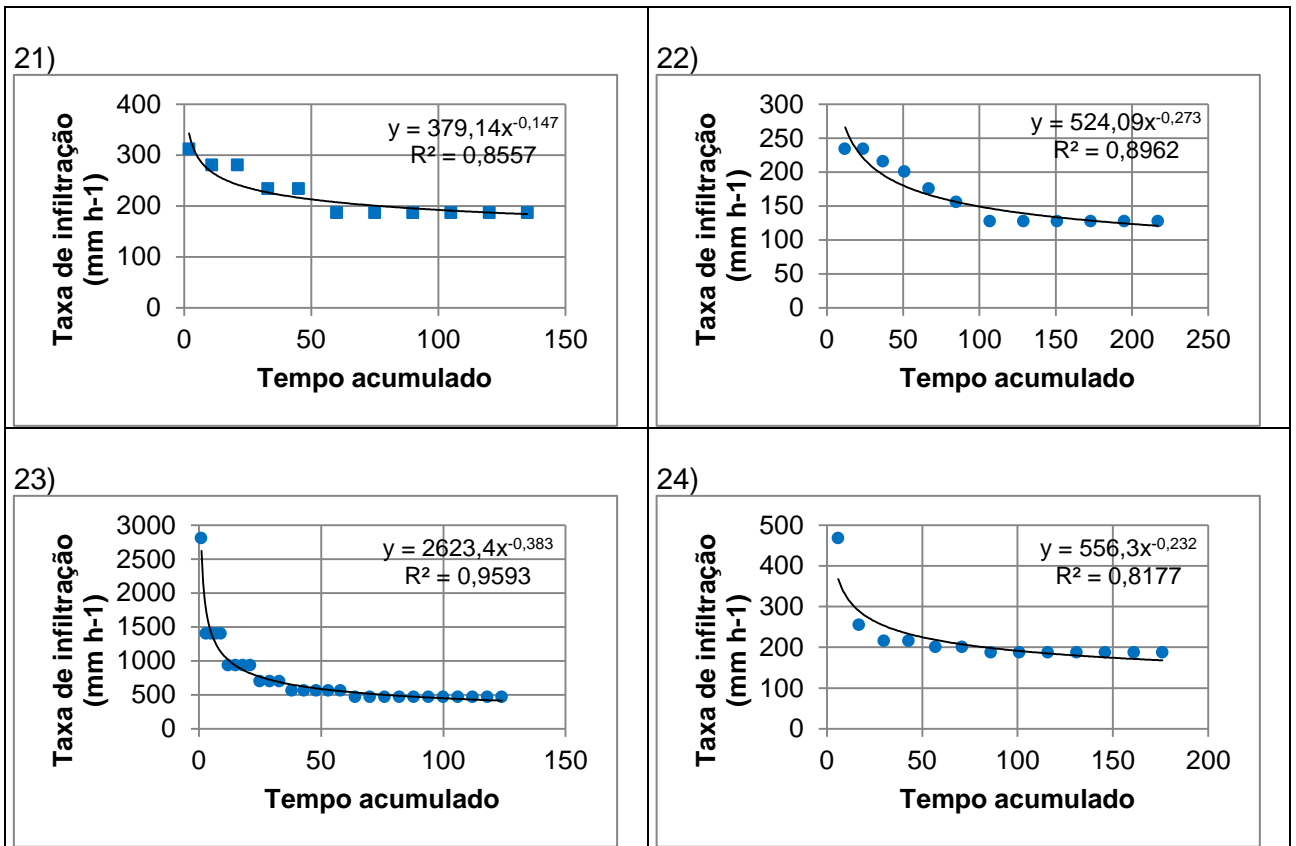
Utilizando o modelo de Kostiakov, Chowdary; Rao; Jaiswal (2006) verificaram, para todas as condições testadas (diferentes diâmetros de cilindros), que os coeficientes de determinação foram superiores a 94% e que as equações com maior  $R^2$  foram as geradas com dados dos cilindros de 10 e 15 cm.

Nos Quadros 1 e 2, observam-se as curvas ajustadas a partir dos dados de infiltração estável, obtidas com os cilindros A7 e A15, respectivamente. A parte superior das curvas (área entre o início do teste e o início do ponto onde a condutividade se estabilizou) representa a velocidade de infiltração instantânea do solo em cada momento da medição. Para todos os ensaios, o comportamento da taxa de infiltração ocorreu de acordo com o esperado, ou seja, curvas com comportamento decrescentes.

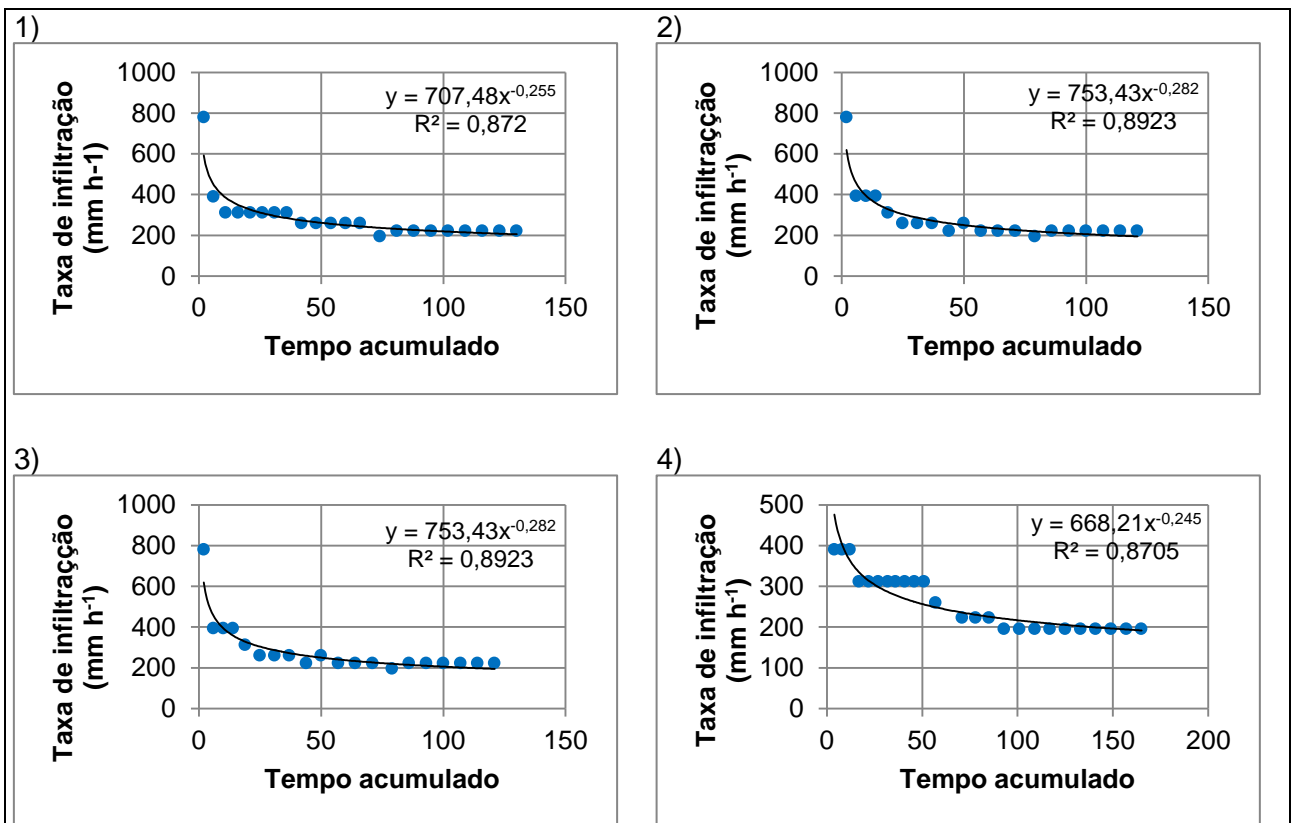


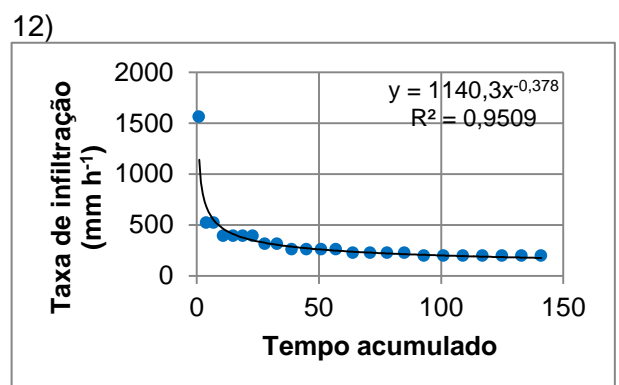
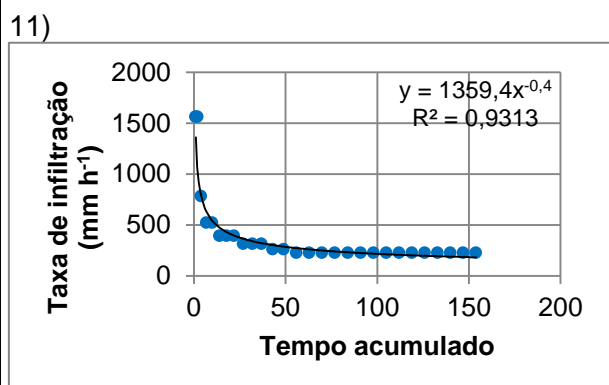
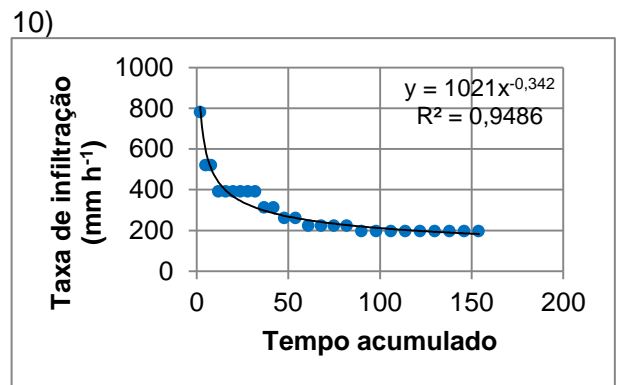
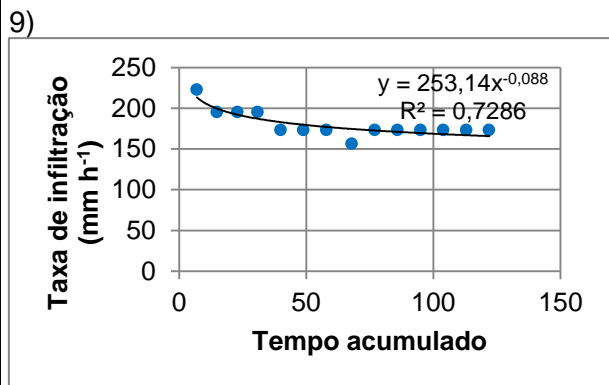
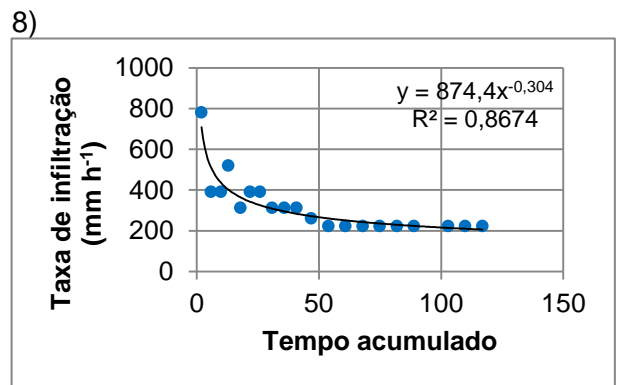
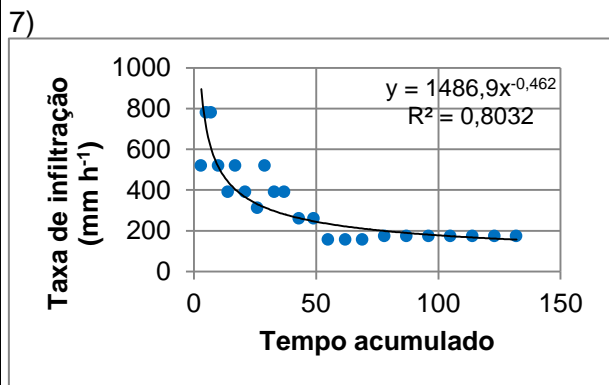
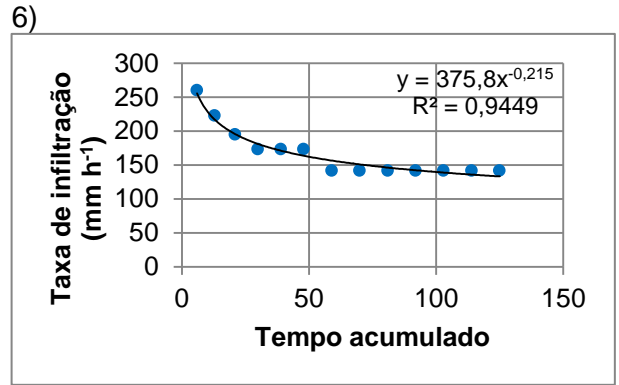
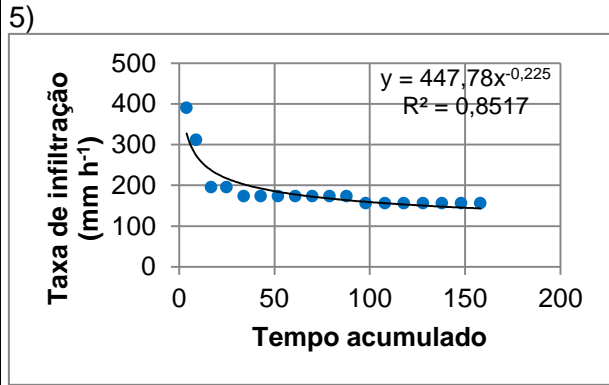






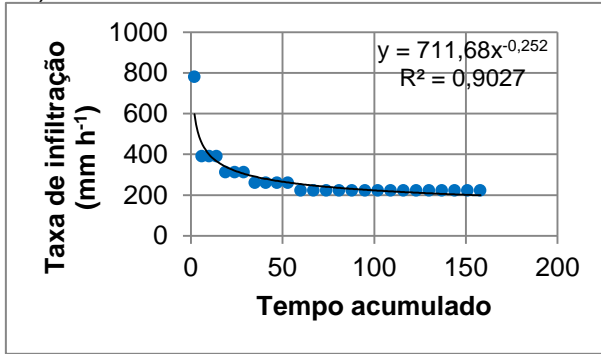
Quadro 1 Curvas de infiltração ajustadas para os 24 pontos amostrais para o cilindro A7



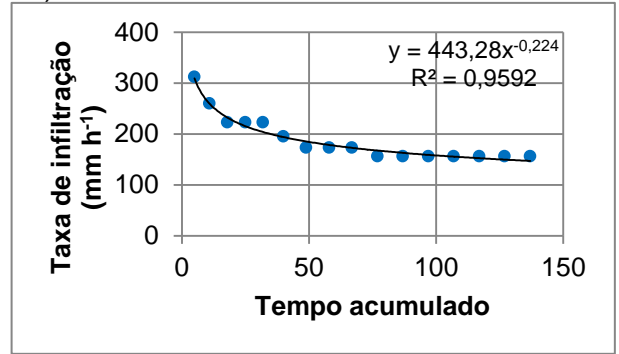




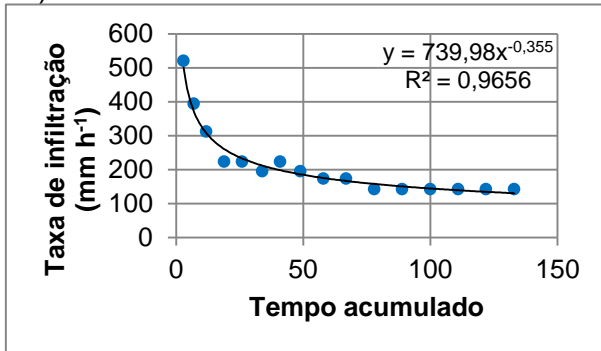
13)



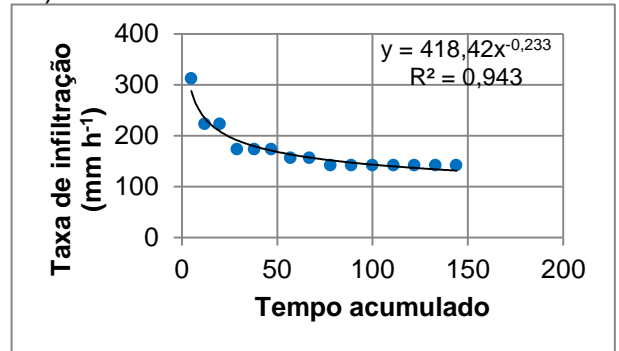
14)



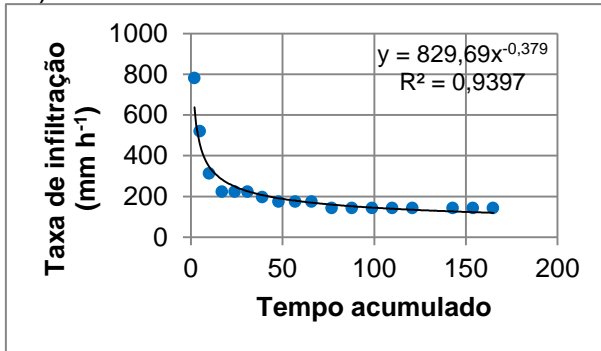
15)



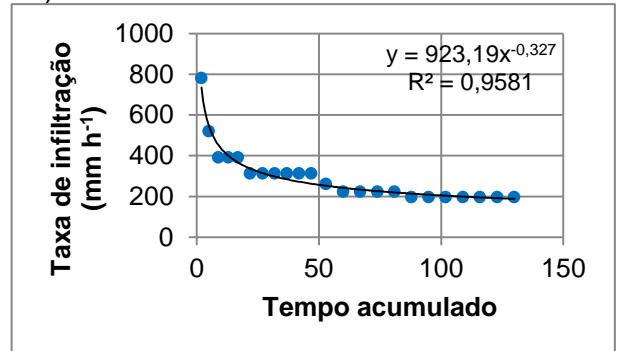
16)



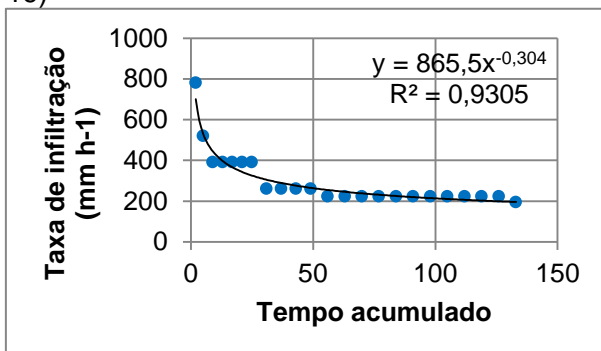
17)



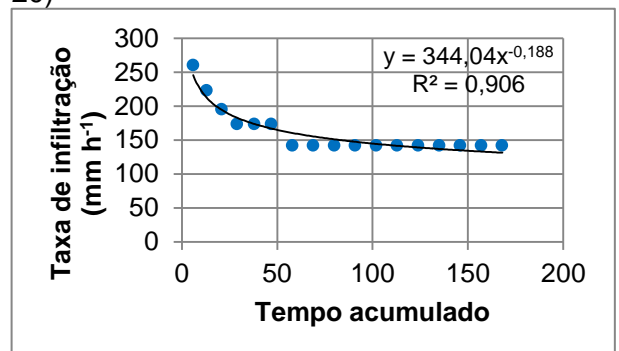
18)

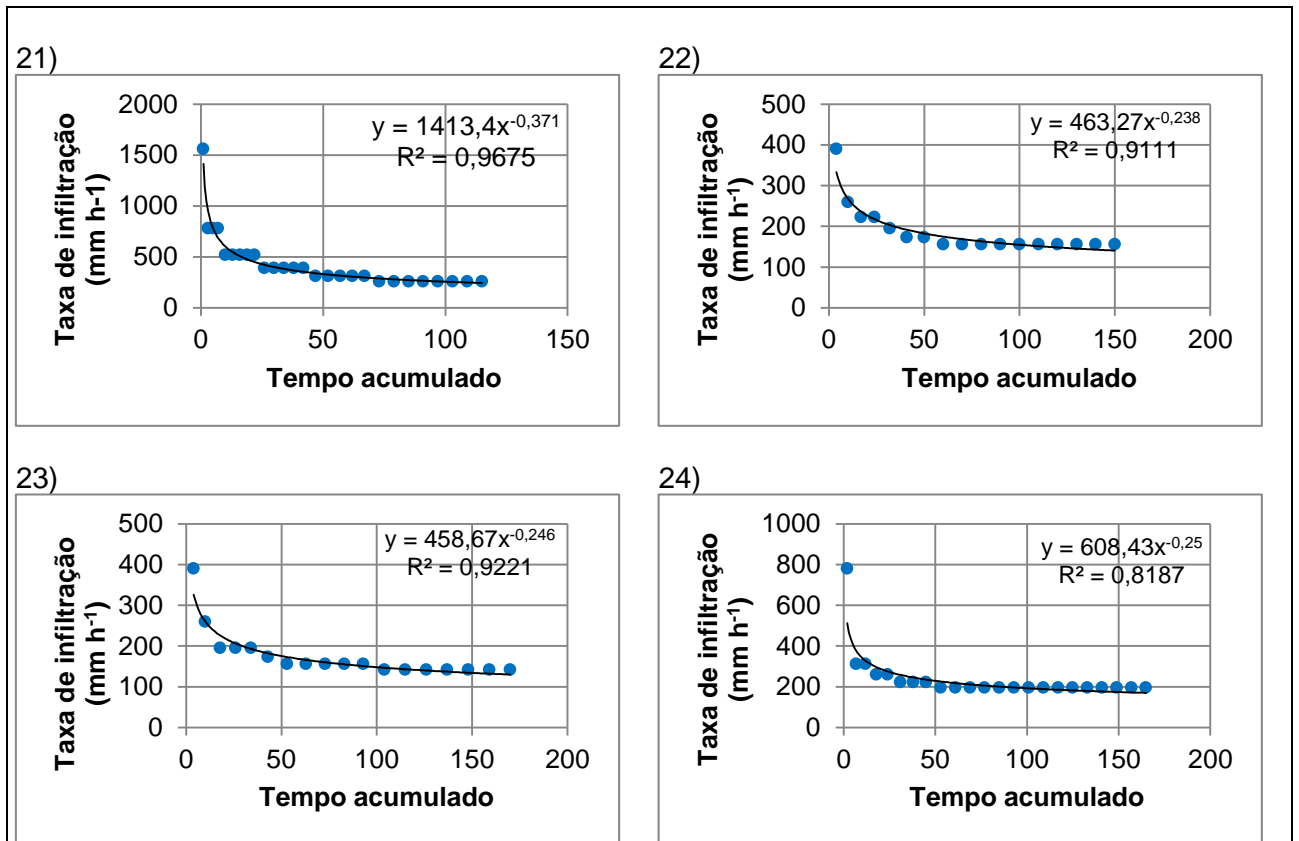


19)



20)





**Quadro 2** Curvas de infiltração ajustadas para os 24 pontos amostrais para o cilindro A15

## 5.2 Taxa de infiltração estável estimada pelos cilindros A7 e A15

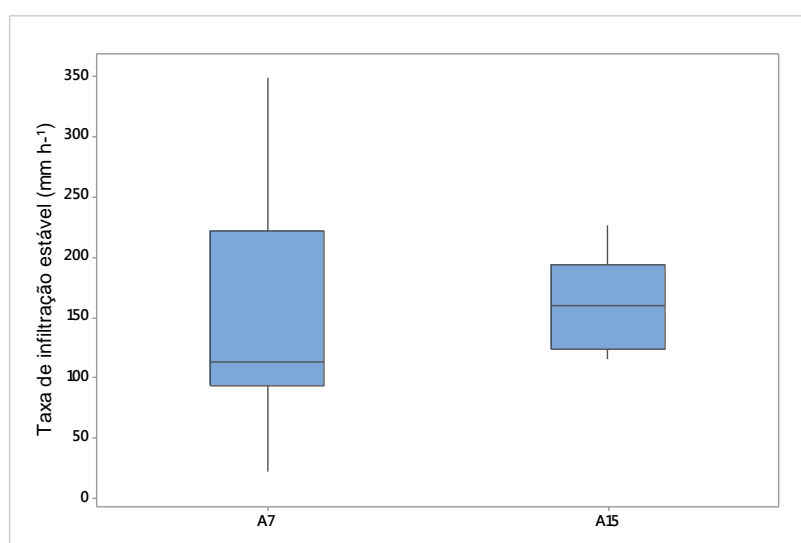
As taxas de infiltração foram estimadas utilizando-se os dois infiltrômetros de 7 cm de diâmetro (A7) e o de 15 cm de diâmetro (A15). Na Tabela 2, as estimativas são apresentadas para cada um dos pontos coletados.

**Tabela 2** Taxa básica de infiltração para os pontos amostrados e suas respectivas dispersões estatísticas.

| Pontos | Continua |        |              |
|--------|----------|--------|--------------|
|        | A7       | A15    | Razão A15/A7 |
| 1      | 108,02   | 222,72 | 2,06         |
| 2      | 255,59   | 222,72 | 0,87         |
| 3      | 127,58   | 222,72 | 1,75         |
| 4      | 255,12   | 194,93 | 0,76         |
| 5      | 134,27   | 155,91 | 1,16         |
| 6      | 133,63   | 141,74 | 1,06         |
| 7      | 107,94   | 173,23 | 1,60         |
| 8      | 140,33   | 222,74 | 1,59         |
| 9      | 107,94   | 173,23 | 1,60         |
| 10     | 311,81   | 194,88 | 0,63         |
| 11     | 350,79   | 222,74 | 0,63         |

|                      |        |        | Conclusão |
|----------------------|--------|--------|-----------|
| 12                   | 400,90 | 194,88 | 0,49      |
| 13                   | 255,12 | 222,74 | 0,87      |
| 14                   | 112,25 | 155,90 | 1,39      |
| 15                   | 100,24 | 141,74 | 1,41      |
| 16                   | 127,58 | 141,74 | 1,11      |
| 17                   | 133,63 | 141,73 | 1,06      |
| 18                   | 350,88 | 194,93 | 0,56      |
| 19                   | 112,25 | 259,84 | 2,31      |
| 20                   | 127,58 | 141,74 | 1,11      |
| 21                   | 187,09 | 259,84 | 1,39      |
| 22                   | 127,58 | 155,90 | 1,22      |
| 23                   | 467,72 | 141,73 | 0,30      |
| 24                   | 187,09 | 194,89 | 1,04      |
| <b>Mínimo</b>        | 100,24 | 141,73 | 0,30      |
| <b>Média</b>         | 196,79 | 187,30 | 1,17      |
| <b>Máximo</b>        | 467,72 | 259,84 | 2,31      |
| <b>Desvio Padrão</b> | 107,89 | 38,54  | 0,50      |
| <b>CV</b>            | 54,82  | 20,57  | 42,75     |

A taxa de infiltração estável variou de 100,24 mm.h<sup>-1</sup> no ponto 15 até 467,72 no ponto 23, para o cilindro A7; e de 141,73 nos pontos 17 e 23 até 259 mm.h<sup>-1</sup> nos pontos 21 e 19, para o cilindro A15. Todavia, os coeficientes de variação obtidos para os dados foram considerados elevados para ensaios agrícolas, acima de 30% (PIMENTEL GOMES, 1985). De acordo com o gráfico Boxplot apresentado na Figura 4, observa-se que não existem pontos discrepantes (*outliers*) para os dados de taxas de infiltração estável para nenhum dos dois cilindros testados. Observa-se também que a dispersão dos dados é maior para o cilindro A7 do que para A15, como observado na Tabela 2 em que o cilindro A7 apresenta maior coeficiente de variação (54,82%) confirmando sua maior variabilidade.



**Figura 4** Boxplot para as taxas de infiltração estáveis nos cilindros A7 e A15.

Haja vista a área possui características de solo relativamente semelhantes, sem grandes variações de textura, profundidade ou composição, a menor variabilidade dos dados de taxa de infiltração básica medidos pelo cilindro A15 pode ser considerada como uma característica positiva. No gráfico Boxplot, considerando a posição da linha que representa a mediana dos dados, pode-se afirmar que os dois cilindros possuem características assimétricas. E, os pontos 2 e 23 no cilindro A7 apresentam valores bem mais elevados (acima de 400 mm/h) que a maioria dos outros pontos. Provavelmente, isso também tenha causado tanto a variabilidade dos dados como a assimetria. O cilindro A7 possui 50% dos dados com valores de taxa de infiltração concentrados abaixo da média  $196 \text{ mm.h}^{-1}$ , enquanto no cilindro A15, os dados apresentam média muito próxima da mediana o que confere menor variabilidade entre os pontos amostrados com relação à taxa de infiltração. Dessa forma, essa informação permite-nos deduzir que o cilindro com maior diâmetro possui maior confiabilidade para coleta de dados de infiltração para o latossolo vermelho distroférico.

Guadagnin; Pauletto e Pinto (2007) destacam que a capacidade de infiltração do solo pode ser de difícil determinação devido às variabilidades espacial e temporal. Fatores locais podem influenciar na determinação dessas. Chen & Wagenet (1992) destacam a densidade do solo, a distribuição e o tamanho dos poros como fatores importantes neste processo. Reichardt & Timm (2004) apontam o conteúdo inicial de água no perfil do solo, a existência de camadas menos permeáveis ao longo do seu perfil e a topografia do terreno como parâmetros que podem interferir nas coletas de dados de infiltração. De fato, embora a área de estudo seja pequena e relativamente homogênea em sua superfície, podem ter havido variações físicas ao longo do perfil do solo.

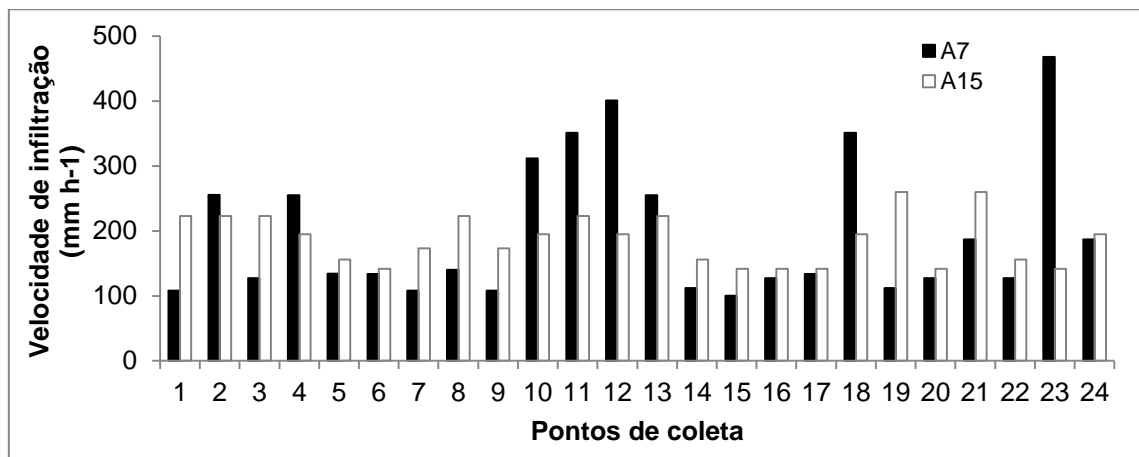
A taxa de infiltração estável média, determinada com cilindro A7, foi de  $196,79 \text{ mm h}^{-1}$  e com o cilindro A15 foi de  $187,30 \text{ mm h}^{-1}$ , cuja diferença foi de 5,6 %. As taxas de infiltração determinadas não diferiram muito das encontradas por Cunha et al. (2009) em um Latossolo Amarelo, utilizando infiltrômetro de cilindro único ( $163,2 \text{ mm h}^{-1}$ ) ou de Sidiras e Roth (1984), determinadas em Latossolo Roxo Distrófico, utilizando anéis concêntricos ( $129 \text{ mm h}^{-1}$ ). Além disso, as taxas de infiltração estável, encontradas neste trabalho então compreendidas entre os valores de infiltração determinadas para um Latossolo textura argilosa por Pott & De Maria (2003), variaram desde  $61,2$  até  $442,2 \text{ mm h}^{-1}$ .

Observa-se que as taxas de infiltração, estimadas com o cilindro A7, foram, em média, superiores às taxas estimadas com o cilindro A15, embora, estatisticamente, pela análise de variância dos dados apresentada na Tabela 3, se constate que os dados coletados para os dois cilindros possam ser considerados iguais, a 5% de significância.

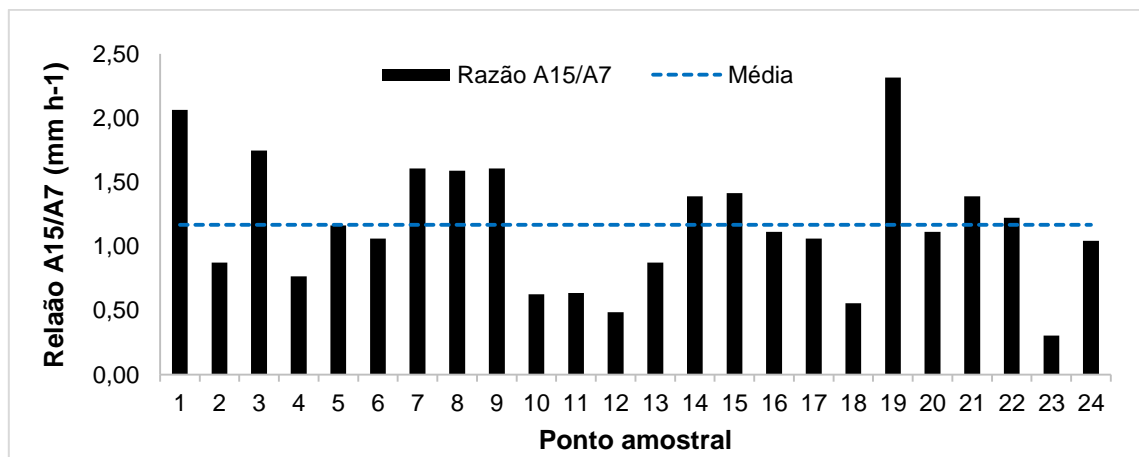
**Tabela 3** Análise de variâncias para comparação dos dados obtidos com os cilindros A7 e A15

|           | G.L. | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | Estat. F | P-valor  |
|-----------|------|-------------------|----------------|----------|----------|
| Cilindros | 24   | 35237,19          | 1468,216       | 0,126135 | 0,999998 |
| Resíduos  | 23   | 267720,3          | 11640,02       |          |          |

Na Figura 5, observa-se a comparação gráfica entre os dados obtidos nos ensaios de infiltração e, na Figura 6, a razão obtida entre os dados de infiltração estável obtidos com os cilindros A15 e A7. As maiores discrepâncias entre os dados obtidos nos ensaios com os cilindros A15 e A7 foram observadas nos pontos 2 e 19.



**Figura 5** Taxas de infiltração estável, mensuradas com os cilindros A7 e A15 nos 24 pontos amostrais.



**Figura 6** Razão entre as taxas de infiltração dos cilindros A15 e A7 nos 24 pontos amostrais.

Chowdary; Rao e Jaiswal (2006) avaliaram as taxas de infiltração em infiltrômetros de cilindro único de 10, 15, 20, 25 e 30 cm de diâmetro e com 6, 13, 16, 20 e 26 cm de altura de represamento, e 7 cm de profundidade de penetração. Os autores compararam os

resultados de infiltração obtidos com os diferentes cilindros a partir das análises de variância. Observa-se pelos resultados demonstrados que não houve diferença significativa entre os dados de infiltração estimados pelos diferentes cilindros, para nenhuma das condições testadas, assim como no presente estudo.

Wang et al. (1998) utilizaram cilindros únicos em infiltrômetro de pressão a fim de avaliar o efeito dos diâmetros na condutividade hidráulica, para cilindros de 5,5, 10, 15, 20 e 34,5 cm. Quando foram comparados os efeitos dos anéis descritos pelos autores, verificou-se que a razão entre as taxas de fluxo observadas para os anéis de 34,5 e 5,5 era aproximadamente de 7 e entre os anéis de 20 e 5,5 era de 10, com potencial de suprimento do solo igual a zero e que essas razões decresciam em função do aumento do potencial de suprimento. Quando comparados os anéis de 15 e de 5,5 para as mesmas condições, a razão calculada foi igual a 5, quase o dobro da relação encontrada para o ponto 19 do presente estudo, a relação mais discrepante observada neste estudo.

### 5.3 Lâmina de Infiltração acumulada estimada pelos cilindros A7 e A15

As lâminas de infiltração acumulada foram estimadas para os infiltrômetros A7 e A15. Estão apresentadas as estimativas para cada um dos pontos coletados na Tabela 4.

**Tabela 4** Lâminas de infiltração acumulada para os infiltrômetros A7 e A15

| Pontos | Lâmina de infiltração acumulada (mm) |        | Umidade Inicial (%) |
|--------|--------------------------------------|--------|---------------------|
|        | A7                                   | A15    |                     |
| 1      | 73,28                                | 310,08 | 35,6                |
| 2      | 129,98                               | 283,32 | 37,52               |
| 3      | 80,55                                | 283,16 | 37,96               |
| 4      | 308,73                               | 356,73 | 18,00               |
| 5      | 102,13                               | 251,81 | 10,98               |
| 6      | 81,10                                | 181,00 | 27,19               |
| 7      | 89,61                                | 309,49 | 13,01               |
| 8      | 94,84                                | 311,30 | 16,79               |
| 9      | 76,60                                | 192,02 | 5,02                |
| 10     | 240,19                               | 363,89 | 22,62               |
| 11     | 268,83                               | 396,87 | 26,05               |
| 12     | 229,27                               | 346,92 | 30,01               |
| 13     | 144,29                               | 364,07 | 14,60               |
| 14     | 91,16                                | 222,34 | 11,71               |
| 15     | 79,47                                | 227,58 | 31,00               |

|                      |        |        |           |
|----------------------|--------|--------|-----------|
| 16                   | 123,51 | 211,75 | 38,88     |
| 17                   | 140,16 | 272,38 | 29,72     |
| 18                   | 191,46 | 311,17 | 23,90     |
| 19                   | 103,04 | 323,00 | 33,03     |
| 20                   | 107,33 | 233,72 | 27,03     |
| 21                   | 100,12 | 382,17 | 6,95      |
|                      |        |        | Conclusão |
| 22                   | 118,70 | 237,95 | 9,76      |
| 23                   | 290,27 | 252,38 | 22,54     |
| 24                   | 130,79 | 325,99 | 25,41     |
| <b>Mínimo</b>        | 73,28  | 181,00 | 5,02      |
| <b>Média</b>         | 175,83 | 142,08 | 23,14     |
| <b>Máximo</b>        | 308,73 | 396,87 | 38,88     |
| <b>Desvio Padrão</b> | 37,99  | 17,88  | 10,25     |
| <b>CV</b>            | 21,59  | 12,58  | 44,30     |

A taxa de infiltração acumulada variou de 73,28 mm.h<sup>-1</sup> no ponto 1, até 308,73 no ponto 4, para o cilindro A7 e de 181,00 até 396,87 mm.h<sup>-1</sup> nos pontos 6 e 11, respectivamente, para o cilindro A15. Desta forma, é possível constatar que o cilindro A15 apresentou menor variabilidade da taxa de infiltração acumulada em relação aos dados estimados pelo cilindro A7.

Podemos observar também que os dados obtidos de taxa de infiltração acumulada não estão relacionados às taxas de umidade inicial do solo, estimadas para ambos os cilindros.

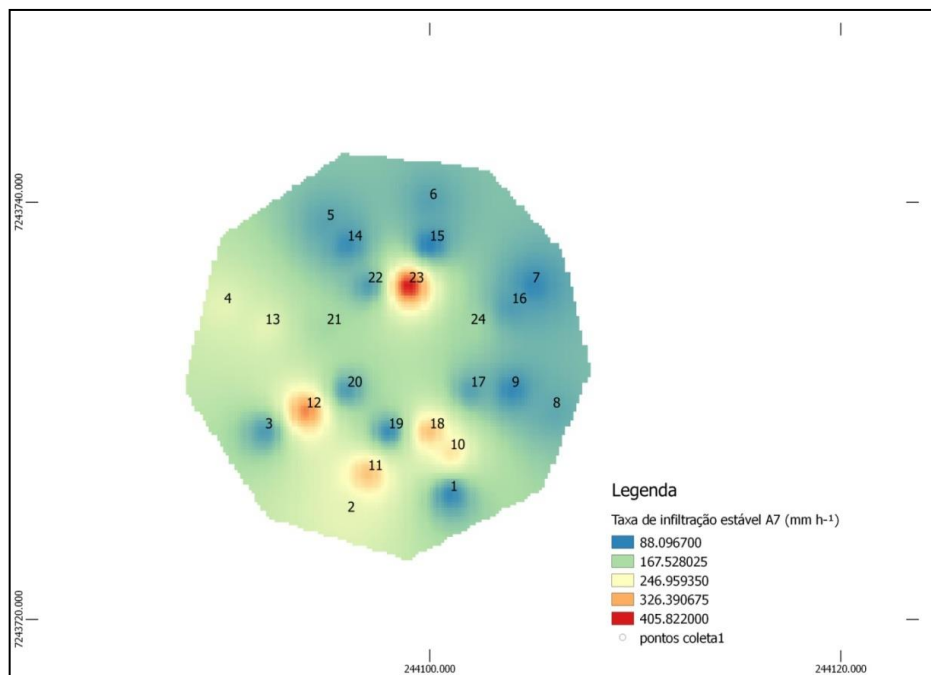
O cilindro A15 apresentou taxas de infiltração acumulada superiores às do cilindro A7 para os 24 pontos amostrados. Isso mostra que a taxa de infiltração acumulada aumentou quando foi utilizado o cilindro de maior diâmetro. Este resultado contraria os resultados obtidos por Chowdary; Rao e Jaiswal (2006), os quais, ao avaliarem as taxas de infiltração acumulada para cilindros únicos de 10, 15, 20, 25 e 30 cm de diâmetros utilizando 7 cm de profundidade de penetração, constataram que as taxas de infiltração acumulada diminuíram com o aumento do diâmetro dos infiltrômetros de cilindros únicos. Deve-se levar em consideração que os estudos foram realizados em tipos de solos distintos e profundidades diferenciadas.

Os mesmos autores ainda constataram que a forma da zona de molhagem é elíptica e o comprimento de umedecimento da zona central do infiltrômetro aumenta com o aumento do diâmetro do cilindro. Desta forma, supõe-se que os valores das taxas de infiltração acumulada, estimados pelo cilindro A15, podem ter apresentado valores superiores em relação aos do cilindro A7, por ter relação direta com o comprimento de umedecimento da zona central do infiltrômetro.

#### 5.4 Distribuição espacial dos dados e interpolação

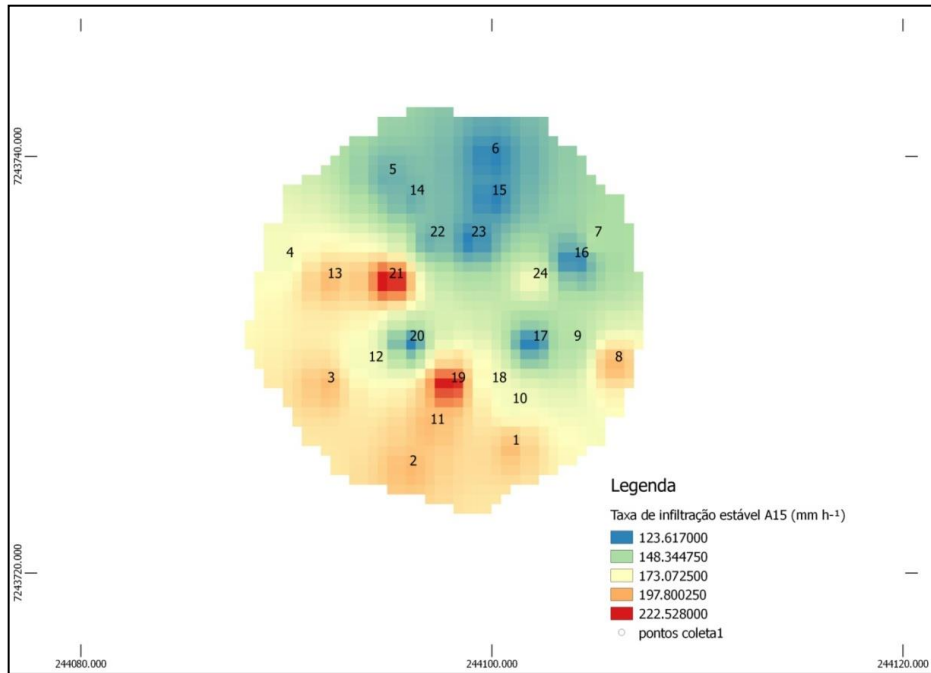
As distribuições espaciais dos dados e a interpolação realizada pelos inversos dos quadrados para as taxas de infiltração estáveis obtidas a partir dos cilindros A7 e A15 estão apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. Observa-se que, para as taxas de infiltração estável, obtidas a partir de ambos os cilindros, os pontos com menores valores estão concentrados nas regiões norte/noroeste da mandala, nas cotas mais altas do terreno.

Os dados de umidade (Figura 9) estão distribuídos espacialmente aproximadamente de acordo com as parcelas delimitadas dentro da mandala. Este fato pode ter ocorrido em função das datas das coletas. A densidade aparente (Figura 10) apresenta distribuição relativamente homogênea, embora as cotas mais altas do terreno também apresentem valores ligeiramente superiores.

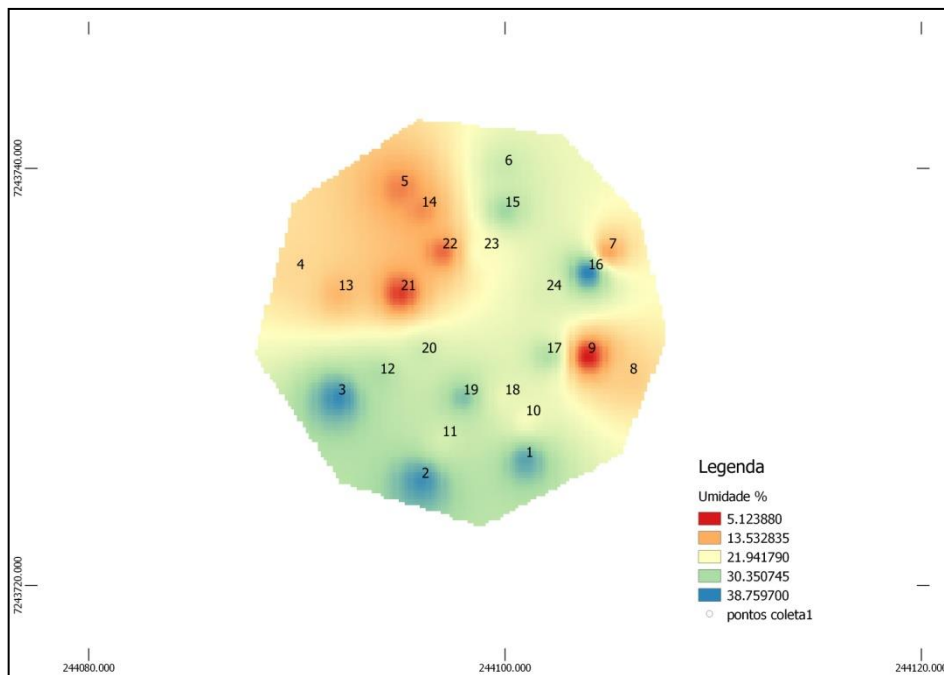


**Figura 7** Interpolação para os dados de taxa de infiltração estável, obtidos a partir do cilindro A7

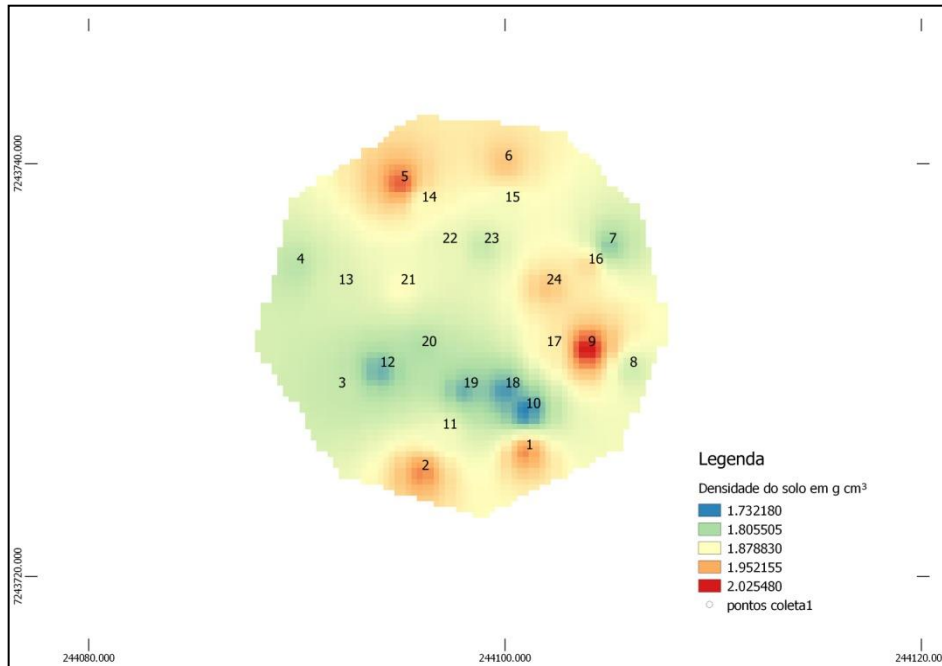




**Figura 8** Interpolação para os dados de taxa de infiltração estável, obtidos a partir do cilindro A15



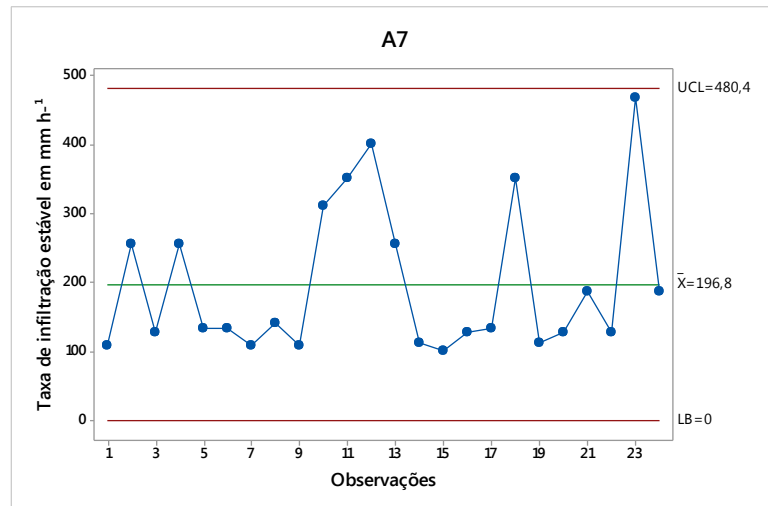
**Figura 9** Interpolação para os dados de umidade inicial do solo



**Figura 10** Interpoção para os dados de densidade do solo

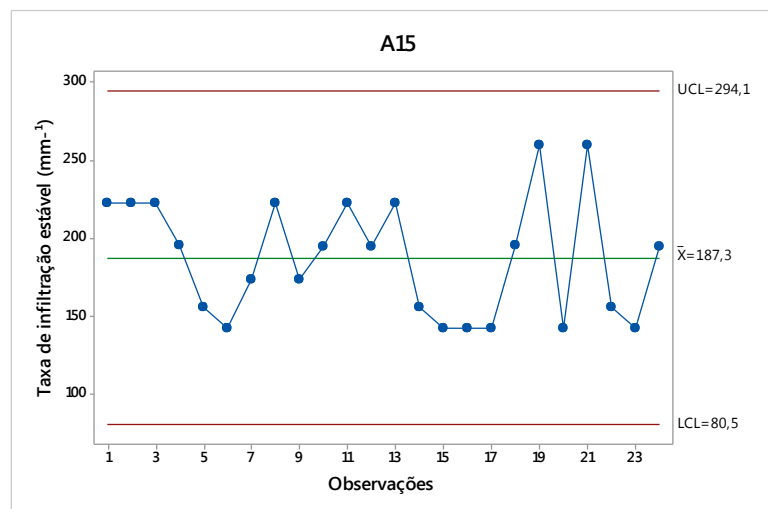
### 5.5 Gráficos de controle de Shewhart

Outra abordagem foi avaliada em relação à distribuição dos dados pela aplicação dos gráficos individuais de controle de Shewhart. Na Figura 11, é apresentado o gráfico de controle individual para as taxas de infiltração estável, obtidas a partir do cilindro A7. O limite inferior foi calculado em -86,9, portanto, definiu-se como limite inferior igual a zero, pois não são admitidos valores negativos para a infiltração. Nota-se que não houve pontos fora dos limites superior e inferior de controle.



**Figura 11** Gráfico de controle de Shewhart para a taxa de infiltração estável com o cilindro A7

Assim, pode-se considerar que o processo está controlado, ou seja, que, embora a análise pura do coeficiente de variação aponte para uma grande dispersão dos dados coletados, eles podem ser considerados controlados pela análise de controle estatístico de processo. O mesmo pode ser aplicado aos dados obtidos a partir do cilindro A15. Os dados observados também não extrapolam os limites superior e inferior definidos (Figura 12).

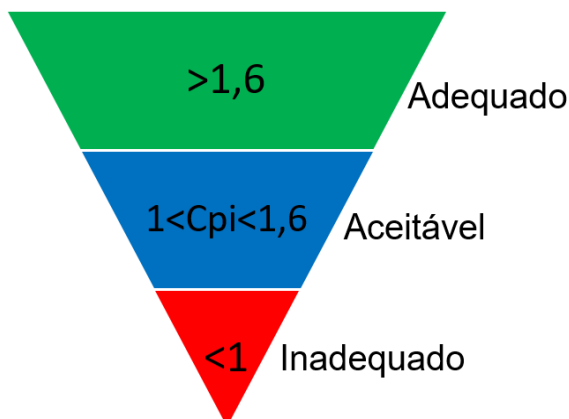


**Figura 12** Gráfico de controle de Shewhart para a taxa de infiltração estável com o cilindro A15

Embora a avaliação dos processos indique que ambos os cilindros apresentem processos controlados, observa-se que, para o cilindro A15, os dados apresentam-se distribuídos mais proximamente ao limite central, indicando maior estabilidade do processo do que os dados obtidos com o cilindro A7.

A capacidade de processo foi estimada em 0,61 para A7 e em 1,62 para A15. Segundo Montgomery (2009), para processos novos, pode-se classificar como capazes ou

adequados valores de Cpi superiores a 1,6, processos aceitáveis cujo Cpi esteja entre 1 e 1,6 e incapazes ou inadequados os processos com Cpi inferior a 1 (Figura 13). Assim, pode-se avaliar a utilização do cilindro A15 como adequada e do cilindro A7 como inadequada para estimativa da taxa de infiltração estável.



**Figura 13** Classificação dos índices de capacidade de processos segundo Montgomery, 2009.

## CONCLUSÕES

A avaliação de infiltração em área de Latossolo Vermelho resultou em taxas de infiltração estável que variaram de 100 a 500 mm h<sup>-1</sup> para cilindro A7 e de 140 a 260 mm h<sup>-1</sup> para o cilindro A15, cujas taxas foram compatíveis com as taxas determinadas por outros métodos em outros trabalhos.

Em relação ao desempenho dos infiltrômetros de cilindros únicos, conclui-se que, embora ambos os cilindros tenham apresentado processos controlados, e não tenham diferido estatisticamente, o cilindro A15 apresentou menos variabilidade dos dados, e pode ser considerado adequado em função do índice de capacidade de processo.

Além disso, não se observou relação consistente entre os dados de umidade inicial e densidade aparente em relação à infiltração da água e que a distribuição espacial observada para os cilindros A7 e A 15 apresenta similaridade e coerência em função da declividade do terreno.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se, como continuidade deste trabalho, a avaliação da infiltração na área com simuladores de chuva, para que haja validação dos infiltrômetros. Além disso, recomenda-se a análise de correlação espacial dos dados.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELKADIR, F. YIMER. Soil water property variations in three adjacent Land use types in the Rift Valley area of Ethiopia. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 11, p. 1067-1071, 2011.

ALBIERO, D.; MACIEL, A. J. da; MILAN, M.; MONTEIRO, L. A. de; MION, R. L. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, CE, v. 43, n. 1, p. 86-95, Jan/Mar., 2012.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Comparação de infiltração de água no solo mensurada em período seco e úmido, em diferentes usos da terra na bacia do arroio Boa Vista, Guamiranga, Paraná. **Ambiência**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 301-317, 2009.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M., ELRICK, D. A. Simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**. v. 68, p. 66-73, 2004.

BAGARELLO, V.; SGROI, A. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 13-24, 2004.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; LAI, J. Testing steady-state analysis of single-ring and square pressure infiltrometer data. **Geoderma**, v. 261, p. 101–109, 2016.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 2006.

BORSSOI, ADILSON L., VILAS BOAS, MARCIO A., REISDÖRFER, MARCELO, HERNÁNDEZ, RICARDO H., & FOLLADOR, FRANCIELE A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 4, p. 718-726, 2012.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. **Anais...** Reflexões sobre geografia física no Brasil. Rio de Janeiro, Bertrand, p. 153-192, 2004.

BOUWER H. Intake rate: cylinder infiltrometer. Klute A, *Methods of soil analysis I, Physical and mineralogical methods*, **Planning**, 2<sup>a</sup> ed, p. 825-844, 1986.

BOUWER, H., BACK, J. T., OLIVER, J. M. Predicting Infiltration and Ground Water Mounds for Artificial Recharge, **Journal of Hydro-environment Research**, ASCE, v. 4, n 4, p. 350-357, 1999.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração de Água no Solo**. Editora UFV, Viçosa, 2006. 120p.

BREMM, R. R. R. **Potencial de lodo de esgoto calado como insumo agrícola para a cultura do milho em Latossolo Vermelho**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

CASTRO, L. C. A. DE; SOUZA, F. DE. Análise dos parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis na irrigação por sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 167-172, 1999.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 377-384, 2005.

CHEN, C. & WAGENET, R. J. Simulations of water and chemicals in macropore soil. Part 1. Representation of the equivalent macropore influence and its affect on soil water flow. **Journal of Hydrology**, v. 130, p. 105-126, 1992.

CHOWDARY, V. M.; RAO, M. D.; JAISWAL, C. S. Study of infiltration process under different experimental conditions. **Agricultural Water Management**, v. 83, n. 1-2, p. 69-78, 2006.

COSTA, M.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, I. B. C. J.; SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

CUNHA, J. L. X. L. et al. Taxa de infiltração da água em um latossolo amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 199-205, 2009.

CRUZ, D. V. DA; FILHO, M. C.; FALCÃO, A. P. S. T. Monitoramento do ph e turbidez das águas no abastecimento de Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, n. 4, p. 459-477, 2014.

DE MORAIS, F. Infiltração – uma variável geomorfológica. **Cadernos de Geografia**, Belo Horizonte, v. 22, n. 38, 2012.

DIETER, J. et al. Performance of lateral move type sprinkler irrigation system. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 12, n. 3-4, p. 325-328, 2014.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.

DURLO, D.; ROJAS, J. W. J.; DURLO, D.; GODOY, J.; MENDES, B. & AQUINO, G. Ensaio de infiltração e permeabilidade da água em uma área de Caçapava do Sul-RS. **Anais... Caçapava do Sul-RS**, v. 7, n. 2, 2016.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2011. 230 p. (Documentos 132). Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/publicações>. Acesso em 19 de março de 2016.

FAGUNDES, E. A. A., KOETZ, M., RUDEL, N., SANTOS, T., & PORTO, R. Determinação da infiltração e taxa de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de cilindro em solo de cerrado no município de Rondonópolis-MT. **Goiânia: enciclopédia biosfera**, v. 8 n. 14, 2012.

FRIGO, J. P.; BOAS, M. A. V.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 318-327, 2013.

FRIGO, J. P.; BOAS, M. A. V.; FRIGO, J. P.; FRIGO, E. P. Comparação entre gráficos de controle de Shewhart, CUSUM E MMEP no processo de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, v. Edição esp, p. 56-70, 2016.

GÓMEZ-RODRÍGUEZ, K.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; VÉLEZ-SÁNCHEZ, J. E. Changes in water availability in the soil due to tractor traffic. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1156-1164, 2013.

GUADAGNIN, C. A.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Solos Construídos Na Área De Mineração De Carvão De Candiota – Rs. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 13, n. 3, p. 337–342, 2007.

HAISE, H. R., W. W. DONNAN, J. T. PHELAN, L. F. LAWLION. AND D. G. SHWKLEY. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. ARS Series 41-7. USDAARS, 1956.

HERMES, E.; ANTÔNIO, M.; BOAS, V.; RODRIGUES, L. N.; MELO, E. L. De. Process capacity index in drip irrigation with cassava wastewater processing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 12, p. 1427-1433, 2015.

HORTON, Robert E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446-460, 1933.

JOSÉ, J. V., REZENDE, R., MARQUES, P. A. A., BUTTURI-GOMES, D., & GONÇALVES, A. C. A. Continuidade espacial da taxa de infiltração básica de água em três solos do noroeste do estado do paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 6, n. 3, p. 517, 2013.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 264-270, mar/abr, 2010.

KAISER-HILL COMPANY, L. L. C. Statistical methods for trending groundwater quality data. **Rocky flats environmental technology site**, 2004.

KLEIN, M. R.; BOAS, M. A. V.; SUSZEK, F. L.; SZEKUT, F. D.; DE MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; SILVA, B. B.; ZUCULOTTO, T. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 13, n. 2, p. 179-183, 2015.

KLEIN, M. R.; SZEKUT, F. D.; REIS, C. F.; BONEMBERGER, S. B.; SUSZEK, F. L.; BOAS, M. A. V. Shewhart charts in the process of application watersystem of drip irrigation of household farming. In: Inovagri - International Meeting, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2012.

KLEIN, M.; SZEKUT, F.; SUSZEK, F.; REIS, C.; AYMORÉ, C.; GUERRA, J.; VILAS-BOAS, M. Uniformidade de irrigação e fertigação em um sistema de irrigação familiar por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas **Engenharia Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 56-69, 2013.

LASSABATÉ, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; UGALDE, J. M. S.; CUENCA, R. B.; HAVERKAMP, R. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. March-April, p. 521–532, 2006.

LAZZAROTTO, E.; GRAMANI, L. M.; CHAVES NETO, A.; COELHO, D. P. Técnica não paramétrica para estabelecer valores limite em gráficos de controle aplicados em dados de instrumentação de barragem.pdf. In: XXX Seminário nacional de grandes barragens, **Anais...**2015.



LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. D. F. Conhecendo os principais solos do PR - Abordagem para professores do ensino fundamental e médio. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 26, 2012.

LOPES, M. B.; MILAN, M.; COELHO, J. L. D. Qualidade em operações agrícolas mecanizadas na cultura de cana-de-açúcar. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 13, p. 26-30, 1995.

MANCUSO, M. A.; FLORES, B. A.; ROSA, G. M. SCHROEDER, J. K.; PRETTO, P. R. P. Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n. 1, Edição Especial p. 2890-2998, 2014.

MERRIAN, J. L.; SHEARER, M. N.; BURT, C. M. Evaluating irrigation systems and practices. In: Jesen, M. E. (ed). **Design and operations of form irrigation systems**. St Joseph: ASAE, p. 721-60, 1983 (Monography Series 3).

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2009.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R. & GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2010.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A. T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 2, p. 261-266, 2002.

MIORANZA, D. et al. Alterações estruturais de um Latossolo argiloso sob plantio direto induzidas pela intensidade de tráfego de um trator. **Agropecuária Técnica**, v. 36, p. 203–211, 2015.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2009.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A. T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 2, p. 261-266, 2002.

MONTGOMERY, D.C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – 4 ed., reimpr.- Rio de Janeiro: LTC, 2009, 513p.

MONTENEGRO, A. A., ABRANTES, C. B., DE LIMA, L. M. P., SINGH, V. P., & SANTOS, E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, v. 109, p. 139-149, 2013.

NEHAZHAD, FALLAH S. M. A new monitoring design for uni-variate statistical quality control charts. Iran Akahavan Niaki: **Information Sciences**, v. 180, 16 out. 2009.

NUNES, J. A. S.; SILVEIRA, M. H. D.; SILVA, T. J. A. da; NUNES, P. C. M.; CARVALHO, K. S. Taxa De Infiltração Pelo Método Do Infiltrômetro De Anéis Concêntricos Em Latossolo Vermelho De Cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, n. V.8, p. 1685–1692, 2012.

OLIVEIRA, A. E. de. Modelagem da infiltração de água no solo com o modelo green-ampt. Dissertação. Programa de pós graduação em ciência do solo, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO, 2015.

ORSSATTO, F.; BOAS, M. A. V.; NAGAMINE, R.; URIBE-OPAZO, M. A. Shewhart's control charts and process capability ratio applied to a sewage treatment station. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 770–779, 2014.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S. de; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1777-1785, 2011.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**, 14ª ed. Piracicaba: Nobel, 2000.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da taxa de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 19-27, 2003.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da taxa de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 19-27, 2003.

PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; ENCIDE, A. P.; ROSOLEM, C. A. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB ESCARIFICAÇÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 693-700, 2010.

PRUSKI, F.F. et al. Infiltração da água no solo. Engenharia na Agricultura. **Caderno Didático 25**, 1997.

QGIS Development Team, 2017. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. <http://www.qgis.org/>

QGIS Development Team, 2017. QGIS 2.8; Geographic Information System User Guide. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Electronic document: [http://docs.qgis.org/<2.8>/en/docs/user\\_manual/](http://docs.qgis.org/<2.8>/en/docs/user_manual/)

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, p. 449-469, 2004.

REIS, C. F. dos; VILAS BOAS, M. A.; MERCANTE, E.; HERMES, E.; REISDORFER, M. Avaliação da qualidade da água para irrigação em Salto do Lontra – PR. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 1, p. 69-78, jan./mar., 2011.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Poned Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. 1990.

RICE, R.; MILCZAREK, M.; KELLER, J. Single-ring Infiltrometer Method with Lateral Correction Double Ring and Corrected Single Ring Infiltrometer Comparison. In: 1999, **Anais...**2009.

SHAH, SHIKHA; JAIN, R. K.; GANDHI, H. M. Review on Experimental Study of Influence of Soil Parameters on Infiltration Capacity. **International Journal for Innovative Research in Science and Technology**, v. 1, n. 12, p. 145-147, 2015.

SCHERPINSKI, C., OPAZO, M. A. U., BOAS, M. A. V., SAMPAIO, S. C., & JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2009.

SCHOENEBERGER, P. J.; WYSOCKI, D. A. Hydrology of soils and deepregolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, p. 117-128, 2005.

SECCOII, A. D.; REINERTIII, R J; REICHERTIII, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, 2011.

SIMÕES, W. L.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, E. L. DA. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 359-366, 2005.

SILVA, E. M.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

SILVA, S. D. A., SOUZA LIMA, J. S. D., SOUZA, G. S. D., & OLIVEIRA, R. B. D. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia (Arica)**, v. 26 n. 2, p. 75-81, 2008.

SKAGGS, R. W.; KILLER, D. E.; BROOKS, R. H. Soil Water. In: JENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, p.77-123, 1983.

SOBRINHO, T. A. et al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

SOUZA, G. S. DE et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Infiltration measurements with Double-ring infiltrimeters and a rainfall Simulator under different surface conditions on an oxisoil, **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, p. 161-168, 1984.

SILVA, R. P. DA et al. Qualidade das operações de preparo reduzido do solo e transplântio mecanizado de mudas de café. **Coffee Science**, v. 9, n. 1, p. 51-60, 2014.

SILVA, J. E. R. DA; CUNHA, J. P. A. R. DA; NOMEINI, Q. S. S. Controle estatístico de processo em pulverização hidropneumática na cultura do café. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 11-21, 2016.

SIMÕES, W. L.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, E. L. da. Uso Do Cilindro Infiltrômetro Único Em Diferentes Solos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 359-366, 2005.

SIMÕES, W. L.; FIGUEIRÊDO, V. B.; SILVA, E. L. DA. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 359-366, 2005.

SONCELA, R. et al. Electrical conductivity of soil irrigated with swine wastewater estimated by time-domain reflectometry. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1293-1300, 2011.

SOUZA, G. S. De; LIMA, J. S. D. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. DA. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

USDA UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Infiltration - Soil Quality Kit - Guide for Educators**. [s.l: s.n.].

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

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, n. 45, p. 1040-1048, 1981.

VILARINHO, N. K. C.; KOETZ, M.; SCHLICHTING, A. F.; SILVA, M. C. M.; SILVA, E. M. B. Determinação da taxa de infiltração estável de água em solo de cerrado nativo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza, v. 7, n. 1, p. 17-26, 2013.

WANG, D. et al. Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. **Soil Science**, 1998.

WU, L.; PAN, L. A. **Generalized Solution to infiltration from Single-Ring Infiltrometers by Scaling**. 1996.

WANG, D.; YATES, S. R.; LOWERY, B.; VAN GENUCHTEN, M. T. **Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters** **Soil Science**, 1998.

XU, X.; LEWIS, C.; LIU, W.; ALBERTSON, J. D.; KIELY, G. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: comparison of BEST and Wu methods. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 34-41, 2012.

YOUNGS, E. G. Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements. **Journal of Soil Science**, p. 623-632, 1987.

ZHOU, W.; BECK, B. F.; PETTIT, A. J.; WANG, J. Application of water quality control charts to spring monitoring in karst terranes. **Environmental geology**. Heidelberg, v. 53, n. 6, p. 1311-1321, 2008.