

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RÓBSON ILHA

**ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM “VÉRTICAL MULCHING”**

Santa Maria, RS
2018

Róbson Ilha

**ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO COM “VERTICAL MULCHING”**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Civil**.

Orientador: João Batista Dias de Paiva

Co-orientador: Afranio Almir Righes

Santa Maria, RS
2018

Ilha, Róbson

Escoamento superficial e infiltração de água no solo em sistema plantio direto com "vertical mulching" / Róbson Ilha.- 2018.

175 p.; 30 cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva

Coorientador: Afranio Almir Righes

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2018

1. modelo de infiltração 2. modelo de escoamento superficial 3. espaçamento entre sulcos 4. conteúdo de água no solo I. Dias de Paiva, João Batista II. Almir Righes, Afranio III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Róbson Ilha.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: ilha.robson@gmail.com

Róbson Ilha

ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM “VERTICAL MULCHING”

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Civil**.

Aprovado em 26 de outubro de 2018

João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Afranio Almir Righes, Ph.D. (UFN)
(Co-orientador)

Adilson Pinheiro, Dr. (FURB)

José Antônio Saldanha Louzada, Dr. (UFRGS)

João Francisco Carlexo Horn, Dr. (UFSM)

Nilza Maria dos Reis Castro, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Jorge e Lourdete e aos meus irmãos Patrícia e Rafael pelo apoio, amor e carinho;

À minha namorada, Juliana, pelo apoio em todos os momentos, amor, carinho e companheirismo ao longo dos anos que compartilhamos;

À Universidade Federal de Santa Maria pela qualidade do ensino público e gratuito;

Agradeço ao professor João Batista Dias de Paiva pela orientação durante a realização deste trabalho, pelo apoio e confiança durante os anos de mestrado e doutorado;

Agradeço ao professor e co-orientador Afranio Almir Righes pelo apoio constante desde a graduação e pelos ensinamentos passados;

Agradeço ao Professor Heinz Borg, Martin Luther University e à CAPES-PDSE* por terem me proporcionado uma grande experiência pessoal e profissional e a oportunidade de conviver, durante seis meses, em um centro de excelência na área de física do solo;

Agradeço ainda citando o nome de Martina Wolter, a todos professores e funcionários do Instituto de Ciências Naturais III da MLU pela feliz e cordial acolhida;

Agradeço à FEPAGRO-Florestas e seus funcionários pela ajuda na realização deste estudo, onde mesmo passando por tantos problemas e incertezas de ordem política, gerados pelo descaso do setor público com as instituições estaduais de pesquisa, sempre estiveram à disposição para o desenvolvimento da ciência;

Agradeço aos bolsistas e amigos João Pedro e Danlei pelos bons momentos vividos e pela ajuda nos experimentos a campo. Agradeço também ao Felipe pela ajuda na construção dos sensores em arduíno;

Agradeço aos colegas e funcionários do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil em especial ao técnico Fábio França pela ajuda também na condução dos experimentos a campo;

Agradeço a todos os amigos pelos momentos de descontração e felicidade;

A Deus e a todos que acreditaram em mim, muito obrigado!

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros e TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser. Que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver.

- Amyr Klink -

RESUMO

ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM “VERTICAL MULCHING”

AUTOR: Róbson Ilha

ORIENTADOR: João Batista Dias de Paiva

A reduzida infiltração de água no solo em áreas de intensivo manejo agrícola é um dos principais problemas hidrológicos existentes. Isso reduz o conteúdo de água no perfil do solo e ocasiona o aumento do escoamento superficial que está diretamente associado com a erosão do solo. A técnica do vertical mulching (VM) associada ao sistema plantio direto é possível de ser aplicada visando reduzir os problemas de infiltração de água no solo, entretanto são encontrados poucos estudos relacionados a eficácia da técnica. O objetivo geral do estudo é avaliar o efeito do VM em sistema plantio direto na detenção do escoamento superficial, na infiltração e distribuição de água no solo. O experimento foi desenvolvido na cidade de Santa Maria, RS, em solo de textura franco arenosa. Para obtenção de dados a campo foi montado conjunto experimental de dois tratamentos com três repetições cada. Os tratamentos foram T_{com} – sistema plantio direto com VM, e T_{sem} – sistema plantio direto sem VM (testemunha). Foram realizadas simulações de chuvas com o monitoramento do escoamento superficial e do conteúdo de água no solo. Os dados coletados foram utilizados para calibrar e validar dois modelos hidrológicos. O primeiro deles é o modelo de Green e Ampt (1911) modificado por Mein e Larson (1973) que foi utilizado para simular o escoamento superficial com diferentes espaçamentos entre sulcos do VM. O segundo é o modelo de infiltração bi-dimensional denominado Infil2D desenvolvido pela Faculdade de Ciências Naturais III da Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg em Halle, Alemanha, cujo propósito foi avaliar a distribuição de água por meio do sulco do VM. Para a chuva de intensidade de $41,76 \text{ mm h}^{-1}$ com duração de 120 minutos não houve escoamento superficial para espaçamento entre sulcos de até 20 m. Os espaçamentos entre sulcos de 5 e 10 metros apresentaram boa eficiência em deter o escoamento superficial para a chuva intensa de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ com duração de 60 minutos, com exceção da condição no espaçamento de 10 metros quando o conteúdo de água inicial no solo foi elevado (32%-vol.). Nessas condições o escoamento ainda foi reduzido em 94%. Com intensidade de chuva de 124 mm h^{-1} e duração de 20 minutos houve considerável volume escoado superficialmente para os espaçamentos de 10, 15, 20 e 25, embora a quantidade tenha diminuído (na condição $\theta_i = 32\%$ -vol.) em pelo menos 74, 54, 41 e 32% respectivamente, em comparação a área sem VM. Mesmo para o espaçamento de 5 m, ainda houve escoamento superficial em conteúdos de água no solo mais altos. No entanto, o escoamento foi reduzido em mais de 79%. Isso significa que o espaçamento entre sulcos de 5 m pode não impedir completamente as perdas de água em áreas agrícolas criadas por chuvas de curta duração e alta intensidade. No entanto, para durações mais longas com intensidades de menor valor os espaçamentos de 5 e 10 m são altamente eficazes na retenção do escoamento superficial. As intensidades acima mencionadas representam as precipitações de 120, 60 e 20 minutos, respectivamente, com um período de retorno de 20 anos. Quanto a distribuição de água no solo no entorno do VM os dados coletados a campo demonstram que o efeito do VM no conteúdo de água no solo não pode ser observado poucas horas após o final da infiltração, pois a drenagem ocorre rapidamente e a infiltração da superfície do solo encobre o efeito da infiltração proveniente do sulco. Para solos de textura argilosa, franco argilosa e franco arenosa a análise com o modelo Infil2D indica o mesmo. A distribuição de água no solo, a partir do sulco do VM, não se propaga mais que 1,20 m de distância do VM no sentido horizontal. Isso significa que o VM não aumenta de forma significativa o volume de água disponível para as plantas. No entanto aumentando a quantidade de água que infiltra a técnica contribui para o abastecimento de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Modelo de infiltração, modelo de escoamento superficial, espaçamento entre sulcos, conteúdo de água no solo.

ABSTRACT

SURFACE RUNOFF AND SOIL WATER INFILTRATION IN A NO TILLAGE SYSTEM WITH VERTICAL MULCHING

AUTHOR: Róbson Ilha

ADVISOR: João Batista Dias de Paiva

The reduced infiltration of water into the soil in areas of intensive agriculture is one of the main problems in hydrology. It decreases the water content in the soil profile and causes an increase in surface runoff which is directly associated with soil erosion. The technique of vertical mulching (VM) can be applied in conjunction with a no tillage system to improve water infiltration. To date few studies looked at the efficacy of this technique. Hence, the aim of the study here is to evaluate the effect of VM in a no tillage system on the reduction of runoff, the increase in infiltration, and the distribution of water in the soil. Experiments were carried out on a sandy loam near the city of Santa Maria, RS, Brazil. The field experiments consisted of two treatments (no tillage with VM – T_{com} , and no tillage without – VM, T_{sem} = control) with three replications. Artificial rainfall was applied, and soil water content and surface runoff were monitored. The data collected were used to calibrate and validate two hydrologic models. The first one is the model of Green and Ampt (1911) as modified by Mein and Larson (1973) which was used to simulate surface runoff for different spacings between the ditches. The second is the two-dimensional infiltration model Infil2D developed at the Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg in Halle, Germany. It was used to evaluate the water distribution in the soil around the ditches during infiltration. For a rainfall with an intensity of 41.76 mm h^{-1} lasting for 120 minutes there was no runoff for ditch spacings as large as 20 m. Spacings between the ditches of 5 and 10 m were shown to prevent runoff from a rainfall with an intensity of 65.83 mm h^{-1} lasting for 60 minutes, except the 10 m spacing when the initial soil moisture content was high (32%-vol.). Under these conditions runoff was still reduced by 94%. For a rainfall intensity of 124 mm h^{-1} and a duration of 20 minutes there was a considerable amount of surface runoff for ditch spacings of 10, 15, 20 and 25 m, even though the amount was diminished (with $\theta_i = 32\%$ -vol.) by at least 40, 26, 20 and 16%, respectively. Even for a ditch spacing of 5 m there was still some runoff at higher moisture contents. However, it was reduced by $\geq 79\%$. This means that a ditch spacing of 5 m may still not completely prevent runoff created by rainfalls of short duration but high intensity. However, for longer rainfall durations with lower intensities ditch spacings of 5 to 10 m are highly effective in preventing surface runoff. Note that at this site the aforementioned intensities represent the 120, 60 and 20 minute rainfall, respectively, with a return period of 20 years. Concerning the distribution of water in the soil around the ditches, the data collected in the field show that an effect of VM cannot be observed a few hours after infiltration stops due to rapid drainage, and because infiltration from the soil surface shrouds the infiltration from the ditch. For clay, clay loam and sandy loam soils an analysis with the Infil2D model indicates the same. It further shows that water does not propagate more than 1.20 m horizontally from the ditches. This means that VM does not significantly increase the amount of water available to plants. However, by increasing the amount of water which infiltrates into and then passes through the soil this technique contributes to the supply of groundwater.

Keywords: Infiltration modeling, runoff modeling, computation of ditch spacing, soil water content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da taxa de infiltração (i) e infiltração acumulada (I) no tempo	34
Figura 2 – Representação do método <i>vertical mulching</i>	40
Figura 3 – Localização do experimento	43
Figura 4 – Representação das parcelas experimentais e tratamentos	45
Figura 5 – Conjunto experimental. a) parcelas; b) detalhe do sulco do vertical mulching; c) e d) detalhes das calhas coletoras	46
Figura 6 – Teste de drenagem. a) área preparada para o experimento; b) lâmina d'água aplicada com altura de 10 cm; c) cobertura do local por lona plástica para evitar evaporação	49
Figura 7 – Representação do simulador de chuva	51
Figura 8 – Teste de precipitação do simulador	52
Figura 9 – Relação entre vazão (Q) e cota (H) para as calhas <i>HL</i>	54
Figura 10 – Perfis do conteúdo de água no solo para os tempos inicial, 4, 24, 32 e 48 horas. Tubo instalado: a) a 0,8 m; b) a 1,2 m; c) a 2,0 m de distância do VM	57
Figura 11 – Disposição dos tubos de acesso utilizados nas medições do conteúdo de água no solo em T_{com}	58
Figura 12 – Curvas de retenção de água no solo para as onze camadas de amostragem	68
Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo e equações para as quatro camadas definidas. a) camada de 0,00 - 0,18 m; b) camada de 0,18 - 0,72 m; c) camada de 0,72 - 0,90 m; d) camada de 0,90 - 1,98 m	70
Figura 14 – Regressões e equações da relação conteúdo de água no solo e tempo. a) camada de 0,00 - 0,18 m; b) camada de 0,54 - 0,72 m	73
Figura 15 – Taxa de escoamento superficial (es) em função do tempo para S1 com intensidade de precipitação de 80 mm h^{-1} durante 120 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada	75
Figura 16 – Taxa de escoamento superficial (es) em função do tempo para S2 com intensidade de precipitação de 80 mm h^{-1} durante 65 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada	76
Figura 17 – Taxa de escoamento superficial (es) em função do tempo para S3 com intensidade de precipitação de 97 mm h^{-1} durante 65 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada	76

Figura 18 – Curvas de infiltração obtidas por: a) simulador de chuva para S1; b) simulador de chuva para S2; c) simulador de chuva para S3; d) infiltrômetro de duplo anel	79
Figura 19 – Curvas de infiltração obtidas pelo método do infiltrômetro. a) taxa de infiltração (i); b) infiltração acumulada (I)	80
Figura 20 – Curvas de infiltração no vertical mulching. a) S1; b) S2; c) S3	81
Figura 21 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S1. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3	84
Figura 22 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S2. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3	85
Figura 23 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S3. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3	86
Figura 24 – Curvas de calibração do modelo GA-ML. a) S3_R2 (melhor ajuste); b) S1_R2 (pior ajuste)	88
Figura 25 – Sensibilidade do modelo de GA-ML. a) Sensibilidade ao parâmetro K_s ; b) sensibilidade ao parâmetro τ . Todos cálculos foram realizados com $\theta_i = 24\%$ -vol., $\theta_s = 34\%$ -vol., e $p = 66 \text{ mm h}^{-1}$. O valor padrão para K_s foi de $24,1 \text{ mm h}^{-1}$ e para τ foi de $31,1 \text{ cm}$. Esses valores foram alterados por um fator que variou de $0,6$ a $1,4$	89
Figura 26 – Comparação do modelo GA-ML com os parâmetros K_s e τ calibrados com os dados observados. a) S3_R2 (melhor ajuste); b) S2_R3 (pior ajuste)	90
Figura 27 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de taxa de infiltração observados (i_{obs}) e calculados (i_{calc}) pelo modelo com os valores médios de K_s e τ	91
Figura 28 – Taxa de escoamento superficial (es) para diferentes valores de θ_i (% de volume) e duração de 120 minutos. a) Chuva de 40 mm h^{-1} ; b) Chuva de 120 mm h^{-1} . Observe as diferentes escalas nos eixos y	93
Figura 29 – Taxa de escoamento superficial (es) em T_{com} e T_{sem} observados com três repetições e calculados com os parâmetros calibrados do modelo ($K_s = 24,1 \text{ mm h}^{-1}$ e $\tau = 31,1 \text{ cm}$). a) S1; b) S2; c) S3	94
Figura 30 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de taxa de escoamento superficial observados (es_{obs}) e calculados (es_{calc}) por 1 m de sulco. a) T_{sem} ; b) T_{com}	96
Figura 31 – Escoamento superficial acumulado (ES) para T_{com} e T_{sem} calculados pelo modelo GA-ML para diferentes comprimentos de rampa com intensidade de chuva de 124 mm h^{-1} com duração de 20 minutos: a) $\theta_i = 16\%$ -vol.; b) $\theta_i = 32\%$ -vol.	99

Figura 32 – Taxa de escoamento superficial por 1 m de sulco (es) com condições de conteúdo de água inicial de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. para a chuva de intensidade de 124 mm h^{-1} por 20 minutos para diferentes espaçamentos entre sulcos. a) 5 m; b) 10 m; c) 15 m; d) 20 m; e) 25 m	100
Figura 33 – Taxa de escoamento superficial por 1 m de sulco (es) com condições de conteúdo de água inicial de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. para a chuva de intensidade de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ por 60 minutos para diferentes espaçamentos entre sulcos. a) 10 m; b) 15 m; c) 20 m; d) 25 m. No espaçamento de 5 m não houve escoamento superficial	102
Figura 34 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de conteúdo de água no solo observados (θ_{obs}) e calculados (θ_{calc}) com uso dos parâmetros obtidos pela SWRC (tabela 5a)	104
Figura 35 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de conteúdo de água no solo observados (θ_{obs}) e calculados (θ_{calc}) com uso dos parâmetros calibrados	106
Figura 36 – Distribuição do conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos calculados com o modelo Infil2D para as condições medidas a campo (Tabela 2). a) S1; b) S2; c) S3	107
Figura 37 – Conteúdo de água no solo (% de volume) inicial e após 1, 6 e 24 horas de infiltração contínua no sulco calculado com o modelo Infil2D para o solo de textura: a) franco arenosa, b) franco argilosa e c) argilosa	110
Figura 38 – Conteúdo de água no solo (% de volume) inicial e após 1, 6 e 24 horas de infiltração contínua no sulco e na superfície do solo calculado com o modelo Infil2D para o solo de textura: a) franco arenosa, b) franco argilosa e c) argilosa	112

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1	– Características dos aspersores, pressões de operação do sistema, intensidade das precipitações obtidas (p) e valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	53
Tabela 2	– Características das simulações de chuvas realizadas	53
Tabela 3	– Classificação do desempenho de modelos hidrológicos pelos índices NSE e $PBIAS$	65
Tabela 4	– Propriedades físicas do solo	67
Tabela 5a	– Coeficientes a e b das equações da curva de retenção de água no solo para cada camada e umidade de saturação do solo (θ_s) determinados com os dados obtidos em laboratório e tensão matricial crítica (ψ_e) calculada pela equação 6c	69
Tabela 5b	– Coeficientes a e b , e umidade de saturação do solo (θ_s) calculados segundo Campbell (1985) e tensão matricial crítica (ψ_e) calculada pela equação 6c	69
Tabela 6	– Valores do conteúdo de água no solo em função do tempo para as 5 camadas estimada pelas equações de regressão	74
Tabela 7	– Conteúdo inicial de água no solo (θ_i), coeficiente do escoamento superficial (C), volume total escoado e vazão máxima do escoamento superficial ($Q_{m\acute{a}x}$) para as simulações realizadas em T_{com} e T_{sem}	77
Tabela 8	– Taxas de infiltração básicas encontradas com o simulador com diferentes intensidades de precipitação (p) em T_{sem} e infiltrômetro de duplo anel obtidas da relação entre taxa de infiltração e tempo	78
Tabela 9	– Taxas de infiltração básicas encontradas com o simulador com diferentes intensidades de precipitação (p) em T_{sem} e infiltrômetro de duplo anel obtidas da relação entre infiltração acumulada e tempo	80
Tabela 10a	– Taxas máximas de escoamento superficial extraídas das figuras 15, 16 e 17 e taxas de infiltração básica de água no VM (i_{VM}) extraídas dos últimos três pontos da figura 20	82
Tabela 10b	– Escoamento superficial acumulado para T_{com} e T_{sem} e infiltração acumulada em 1 m de sulco do VM (I_{vm})	83
Tabela 11	– Valores obtidos para K_s e τ por meio da calibração do modelo GA-ML	87
Tabela 12	– Valores de $PBIAS$ e NSE obtidos para cada repetição com valores médios de K_s e τ calibrados.....	90
Tabela 13	– Valores de $PBIAS$ e NSE para os ajustes do modelo em T_{com} e T_{sem}	95
Tabela 14	– Coeficientes de classificação do desempenho do modelo de distribuição de água no solo com uso dos parâmetros obtidos pela SWRC (tabela 5a)	104

Tabela 15 – Parâmetros a , b e K_s calibrados	105
Tabela 16 – Coeficientes de classificação do desempenho do modelo de distribuição de água no solo com uso dos parâmetros calibrados	105
Tabela 17 – Parâmetros a , b , umidade saturada do solo (θ_s) e condutividade hidráulica saturada (K_s) segundo Campbell (1985)	108
Quadro 1 – Intensidades máximas de chuva (mm h^{-1}) obtidas pela equação i-d-f deduzida por Ramon (2015) para tempo de retorno (Tr) de 10 e 20 anos e durações de chuva de 20, 60 e 120 minutos para a cidade de Santa Maria – RS.....	62
Quadro 2a – Conteúdo de água no solo e tensão matricial calculada com os parâmetros a e b da tabela 5a obtidos pelo ajuste da SWRC para os dados médios e tempo inicial em S1	71
Quadro 2b – Conteúdo de água no solo e tensão matricial calculada com os parâmetros a e b da tabela 5b obtidos em Campbell (1985) para os dados médios e tempo inicial em S1	72
Quadro 3 – escoamento superficial acumulado (L m^{-2}) para diferentes intensidades de chuva e diferentes valores de conteúdo inicial de água no solo (θ_i) no tempo de a) 20 minutos, b) 60 minutos e c) 120 minutos	92
Quadro 4 – escoamento superficial total (ES em L m^{-1} de sulco) e redução no escoamento superficial comparado as mesmas condições sem vertical mulching (Red. em %) para diferentes espaçamentos de sulco e diferentes valores de conteúdo inicial de água no solo (θ_i). a) com intensidade de chuva de 124 mm h^{-1} com duração de 20 minutos, b) com intensidade de chuva de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ com duração de 60 minutos e c) com intensidade de chuva de $41,76 \text{ mm h}^{-1}$ com duração de 120 minutos	98

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>a</i>	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água no solo
<i>b</i>	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água no solo
<i>C</i>	Coefficiente de escoamento superficial
<i>CUC</i>	Coefficiente de uniformidade de Christiansen
<i>DS</i>	Densidade do solo
<i>Es</i>	Taxa de escoamento superficial
<i>es_{calc}</i>	Taxa de escoamento superficial calculado
<i>es_{obs}</i>	Taxa de escoamento superficial observado
<i>es_r</i>	Taxa de escoamento superficial residual após o sulco
<i>es_{Tcom}</i>	Taxa de escoamento superficial em T _{com}
<i>es_{Tsem}</i>	Taxa de escoamento superficial em T _{sem}
<i>ES</i>	Escoamento superficial acumulado
<i>GA-ML</i>	Modelo de infiltração desenvolvido por Green e Ampt (1911) modificado por Mein e Larson (1973)
<i>i</i>	Taxa de infiltração de água no solo
<i>i_{calc}</i>	Taxa de infiltração de água no solo calculado
<i>i_{obs}</i>	Taxa de infiltração de água no solo observado
<i>i_{VM}</i>	Taxa de infiltração no vertical mulching
<i>I</i>	Infiltração acumulada
<i>I_{VM}</i>	Infiltração acumulada no vertical mulching
<i>K_s</i>	Condutividade hidráulica saturada
<i>Macro</i>	Macroporosidade
<i>Micro</i>	Microporosidade
<i>MMCAS</i>	Métodos mecânicos de conservação de água e solo
<i>MS</i>	Massa do solo seco
<i>NSE</i>	Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe
<i>p</i>	Intensidade da precipitação
<i>PBIAS</i>	Percentual de viés
<i>Psat</i>	Peso do solo saturado
<i>Psec</i>	Peso do solo seco
<i>P6kPa</i>	Peso da amostra em 6 kPa
<i>PT</i>	Porosidade total
<i>Q</i>	Vazão líquida
<i>Q_{máx}</i>	Vazão máxima
<i>r</i>	Coefficiente linear de Pearson
<i>R1, R2 e R3</i>	Repetições 1, 2 e 3
<i>S1, S2 e S3</i>	Simulações de chuva 1, 2 e 3.
<i>SPD</i>	Sistema plantio direto
<i>SWRC</i>	<i>Soil Water Retention Curve</i>
<i>T_{com}</i>	Sistema plantio direto com vertical mulching
<i>T_{sem}</i>	Sistema plantio direto sem vertical mulching
<i>TDR</i>	<i>Time Domain Reflectometry</i>
<i>Tr</i>	Tempo de retorno
<i>V_{solo}</i>	Volume da amostra de solo
<i>VM</i>	Vertical mulching

Δz	Profundidade da frente de molhamento
Θ	Conteúdo de água no solo
θ_i	Conteúdo inicial de água no solo
θ_s	Conteúdo saturado de água no solo
τ	Tensão matricial na frente de molhamento
Ψ_e	Entrada de ar potencial ou potencial matricial crítico
Ψ_m	Potencial matricial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	HIPÓTESES	25
3	OBJETIVOS	27
3.1	Objetivo Geral	27
3.2	Objetivos Específicos	27
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
4.1	Sistema Plantio direto (SPD): Implicações na estrutura físico-hídrica do solo.....	29
4.2	Escoamento Superficial	32
4.3	Infiltração de Água no Solo	33
4.4	Métodos mecânicos de Conservação de água e solo	38
5	MATERIAL E MÉTODOS	43
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	43
5.1.1	Local do estudo.....	43
5.1.2	Design do experimento.....	44
5.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO	46
5.2.1	Densidade, porosidade e textura do solo	46
5.2.2	Curvas de retenção de água no solo.....	48
5.2.3	Teste de drenagem	49
5.3	SIMULAÇÕES DE CHUVA	50
5.4	MONITORAMENTO.....	53
5.4.1	Escoamento superficial.....	53
5.4.2	Taxa de infiltração de água no solo	54
5.4.3	Taxa de infiltração no vertical mulching.....	55
5.4.4	Distribuição de água no solo no entorno do sulco.....	55
5.5	MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	58
5.5.1	Escoamento superficial.....	58
5.5.2	Espaçamento entre sulcos	61
5.6	MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	63
5.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
6.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO	67
6.1.1	Densidade, porosidade e textura do solo	67

6.1.2	Curvas de retenção de água no solo	68
6.1.3	Teste de drenagem	73
6.2	MONITORAMENTO	75
6.2.1	Escoamento superficial	75
6.2.2	Taxa de infiltração de água no solo	77
6.2.3	Taxa de infiltração no vertical Mulching.....	81
6.2.4	Distribuição de água no solo no entorno do sulco	83
6.3	MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	87
6.3.1	Escoamento superficial	87
6.3.2	Espaçamento entre sulcos	94
6.4	MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	103
6.4.1	Calibração do modelo	103
6.4.2	Simulações com os dados obtidos a campo	106
6.4.3	Distribuição de água em diferentes solos.....	108
7	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS.....	115
Apêndice A	Modelo GA-ML escrito em linguagem QB64.....	123
Apêndice B	Relação entre conteúdo inicial de água no solo e tensão matricial calculada com parâmetros da SWRC e por Campbell (1985).	127
Apêndice C	Regressões potenciais e equações para a relação conteúdo de água no solo e tempo para as camadas de 0,18 - 0,36, 0,36 - 0,54 e 0,72 - 0,90 m	131
Apêndice D	Curvas de calibração do modelo GA-ML	133
Apêndice E	Curvas do escoamento superficial (es) simulado pelo modelo de GA-ML.....	137
Apêndice F	Matrizes do conteúdo de água no solo geradas pelo modelo Infil2D...	141
Anexo A	Descrição do modelo Infil2D	155

1 INTRODUÇÃO

Em áreas de intensivo manejo agrícola o tráfego de máquinas pesadas e na pecuária o pisoteio dos animais de criação frequentemente causam a compactação dos solos. Isso reduz a macroporosidade nas camadas superficiais do solo e, conseqüentemente, a infiltração de água e a condutividade hidráulica, gerando aumento do escoamento superficial com redução da disponibilidade de água no perfil do solo para as culturas, assim como na recarga de aquíferos subterrâneos.

O escoamento superficial em áreas agrícolas está diretamente associado com a erosão do solo. Diamond (1997) afirma que os solos utilizados na agricultura são erodidos de 10 a 40 vezes mais rápido do que eles podem se regenerar, reduzindo a produtividade. A deposição do sedimento erodido causa problemas de assoreamento de rios e portos. No passado, degradações severas dos solos causaram o colapso de civilizações (DIAMOND, 1997; MONTGOMERY, 2007). Além disso o aumento do escoamento superficial gera enchentes cada vez mais frequentes com todas as conseqüências que são bem conhecidas.

Com exceção de poucas espécies, as plantas retiram a água que precisam do solo. Assim, com redução da taxa de infiltração haverá menos água disponível para as plantas. A carência da disponibilidade de água no solo gera estresse hídrico, e conseqüentemente o declínio da produtividade agrícola (EHLERS & GOSS, 2003). O fato peculiar é que, mesmo com elevados valores totais de chuva as culturas podem sofrer de estresse hídrico pelo reduzido conteúdo de água armazenado no solo.

A água subterrânea é fonte importante para o abastecimento doméstico, industrial e agrícola. Para reabastecê-la, a água da chuva deve infiltrar no solo e em seguida percolar até atingir o corpo hídrico subterrâneo. Se a taxa de infiltração de água no solo for baixa, ocorrerá menor percolação até as camadas mais profundas e de recarga das águas subterrâneas. Além disso a percolação é maior quanto maior for o conteúdo de água no solo (HILLEL, 1998).

Pode-se afirmar em escala mundial que a reduzida infiltração de água nos solos agrícolas causa problemas hidrológicos com graves conseqüências ambientais (como por exemplo, erosão, assoreamento, enchentes) e econômicas (por exemplo, redução da produtividade agrícola, custo com dragagem, danos causados por inundações, diminuição da água subterrânea). Embora esse problema seja mais intenso em áreas agrícolas, ele atinge direta e indiretamente toda a sociedade.

Na década de 70, no sistema de cultivo convencional houve compactação do solo com formação de camadas de impedimento (pé-de-arado), reduzindo o fluxo de água no perfil do solo. Na época, o desmatamento e a intensa mobilização do solo no sistema de cultivo convencional com duas culturas em sucessão (trigo-soja) a taxa de infiltração básica de água em condições de mata nativa passou de 180 mm h⁻¹ para 8 mm h⁻¹ após 50 anos de cultivo (RIGHES et al., 2002).

Visando minimizar os problemas referentes a erosão hídrica no Brasil, foi implantado o sistema plantio direto (SPD), que por manter a cobertura vegetal sobre a superfície do solo, reduz a degradação dos agregados provocada pelo impacto das gotas de chuva. O aumento da rugosidade do solo contribui em parte na retenção da água na superfície do solo com redução do escoamento superficial. Esse sistema quando bem conduzido aumenta a estabilidade dos agregados diminuindo a erosão do solo quando comparado ao sistema convencional.

Enquanto o SPD é eficaz na redução da erosão hídrica provocada pelo impacto da gota de chuva, pouco tem contribuído em relação a erosão gerada pelo escoamento superficial e ao aumento da infiltração de água no solo, especialmente em áreas declivosas e com grande comprimento de rampa. Desse modo técnicas complementares ao SPD precisam ser utilizadas para aumentar a infiltração e reduzir o escoamento superficial.

A técnica do vertical mulching (VM) associada ao SPD é possível de ser aplicada. Segundo Righes et al. (2002) essa tecnologia consiste em abrir sulcos no solo, em nível, perpendicularmente ao declive, preenchendo-os com palha para mantê-los abertos. Dessa forma o escoamento superficial que desce a encosta, é direcionado para os sulcos permitindo que a água infiltre para as camadas mais profundas do solo que possuem melhor estrutura física. Este método não impede a formação do escoamento superficial, mas diminui a sua distância de percurso assim como sua energia e capacidade de erodir a superfície do solo. Desse modo o VM reduz a erosão e aumenta a infiltração de água no solo.

Os estudos encontrados na literatura, com relação ao uso do método VM se concentram em analisar a influência na contenção do escoamento superficial e de perda de nutrientes no escoamento superficial. Existem poucos estudos que analisam o efeito desse método sobre a distribuição de água no solo no entorno dos sulcos (entre eles pode-se citar o estudo de Redinger et al. (1984)) e o espaçamento ideal entre os sulcos. No entanto, essas são informações importantes para validar o uso da técnica, especialmente para mitigar os problemas de perda de água, solo e o quanto ela é útil para mitigar os problemas de estresse hídrico das culturas.

2 HIPÓTESES

No sistema plantio direto, como ele é praticado atualmente (sem rotação de culturas, cobertura vegetal insuficiente, sem métodos de controle do escoamento superficial), é verificado expressivas perdas de água, principalmente em áreas de relevo ondulado, onde a energia do escoamento superficial tem maior importância nos processos hidrológicos e erosivos. A ausência do revolvimento do solo associado ao tráfego de máquinas agrícolas continua contribuindo com a degradação das propriedades físicas do solo, principalmente a continuidade e o tamanho dos poros, interferindo diretamente na taxa de infiltração de água. De acordo com o exposto as hipóteses deste trabalho são:

- i. O uso do vertical mulching, como método mecânico de controle do escoamento superficial em sistema plantio direto, reduz o escoamento superficial gerado por chuvas intensas.
- ii. O vertical mulching aumenta a infiltração de água no solo, e, conseqüentemente aumenta a disponibilidade de água na faixa entre sulcos para as culturas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do estudo é avaliar o efeito do vertical mulching em sistema plantio direto na detenção do escoamento superficial, na infiltração, distribuição e no armazenamento de água no solo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar a detenção do escoamento superficial com diferentes espaçamentos entre sulcos e condições de conteúdo inicial de água no solo para chuvas intensas.
- ii. Avaliar a infiltração de água em sulcos de vertical mulching e o consequente processo de distribuição de água no perfil do solo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 SISTEMA PLANTIO DIRETO (SPD): IMPLICAÇÕES NA ESTRUTURA FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

O SPD segundo Denardin et al. (2011) pode ser descrito como complexo de processos tecnológicos destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos, compreendendo a mobilização de solo apenas na linha de semeadura, manutenção permanente da cobertura do solo e diversificação de espécies, via rotação de culturas. Os autores ainda comentam que recentemente foi adicionado a esses fundamentos o processo de colher/semeiar, que representa a minimização ou supressão do intervalo de tempo entre a colheita e semeadura.

Apesar do início do SPD ter ocorrido na década de 70, e teoricamente estar bem difundido no país, na prática o que se observa é que entre o conjunto de práticas que formam o SPD, apenas o não revolvimento do solo com aração e gradagens com a semeadura direta na palha (SD) é amplamente utilizado. Denardin et al. (2011) comentam que existem inúmeros fatores para esse cenário, dentre eles se destaca a substancial redução da concentração de solo em suspensão no escoamento superficial, associado ao incipiente conhecimento da mecânica da erosão pluvial por parte de técnicos e produtores rurais, e ainda a frágil consciência conservacionista no Brasil.

Esse sistema apresentou grandes avanços na prevenção da erosão hídrica e conservação do solo em condições suficientes de cobertura vegetal, uma vez que ele elimina na totalidade a desagregação das partículas de solo pelo impacto da gota de chuva, diminuindo desse modo à quantidade de solo disponível para ser transportado pelo escoamento superficial. Esses são alguns dos motivos, pelos quais o SPD predomina hoje no Brasil como o principal sistema de manejo. Segundo a FEBRAPDP (2014) dos 48,8 milhões de hectares utilizados para a produção de grãos, mais de 30 milhões são manejados sob esse sistema. Entretanto, Dias (2014) comenta que deste total de 30 milhões de hectares, em apenas 2,7 milhões deles são seguidas corretamente os conceitos recomendados pelos pesquisadores. O autor também comenta que a monocultura soja/pousio ou sucessões contínuas do tipo soja/milho safrinha ou soja/milheto ocupam indiscutivelmente a maioria da área total com plantio direto no Brasil.

Na região sul do Brasil, onde 80% da área cultivada com soja, milho e trigo é sob o SPD (COOPLANTIO, 2012), também se observam descumprimentos com os fundamentos do

sistema. A ausência do revolvimento do solo associado ao tráfego de máquinas agrícolas, em condições de elevado conteúdo de água, contribui para a degradação das propriedades físicas do solo, diminuindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade nas camadas superficiais (CAVALCANTE et al., 2007; REICHERT et al., 2009). Essa redução da macroporosidade na superfície do solo tem fundamental impacto na redução da taxa de infiltração de água no solo, e na ocorrência do escoamento superficial, já o aumento da microporosidade favorece a retenção de água (REICHERT et al., 2007). De acordo com Mentges et al. (2016) as propriedades como porosidade total, continuidade dos poros e permeabilidade no SPD são afetadas pela granulometria, conteúdo de água e estrutura (compactação). A degradação das propriedades físicas do solo afeta o movimento de água no solo e sua disponibilidade para os ecossistemas que dependem da água.

A compactação do solo é definida segundo Curi et al. (1993) como sendo a redução do volume do solo ocasionado por compressão. A compactação torna o rearranjo mais denso das partículas do solo, o que resulta na redução da porosidade interferindo no fluxo de água e solutos, temperatura e crescimento de raízes. A compactação não só reduz o volume total de poros, mas também modifica a distribuição do tamanho dos poros, geometria a morfologia e a conectividade dos poros do solo (SERVADIO et al., 2001). Esse problema foi intensificado nas últimas décadas com o aumento na tecnologia agrícola, e o consequente uso de máquinas agrícolas maiores e mais pesadas. Com a expansão do SPD, conforme comentado no item anterior, houve significativa diminuição no revolvimento do solo, e a camada superficial do solo continua a ser compactada.

A compactação do solo apresenta estreita relação com algumas propriedades físicas do solo, sendo o fator limitante para a infiltração de água. Segundo Reichert et al., (2007) o fluxo de água no solo é reduzido de acordo com o decréscimo do diâmetro do poro, alterando as quantidades de macroporos e microporos em sua estrutura. A microporosidade é responsável pela retenção de água no solo, enquanto que a macroporosidade é responsável pela aeração e drenagem de água. O volume e a disposição dos macroporos são determinantes para a fase ar do solo (BLACKWELL et al., 1990; SCHJØNNING et al., 2005; KUNCORO et al., 2014) e a fase água (IVERSEN et al., 2003; ALAOUI et al., 2011; KUNCORO et al., 2014).

A compactação do solo, causada por fatores externos, afeta a geometria dos poros, e consequentemente a retenção de água (WÓJCIGA et al., 2009; GREGORY et al., 2010; MATTHEWS et al., 2010). Essa deformação do solo tem implicações significativas para as funções físicas do solo (GREGORY et al., 2010), e são responsáveis por quase todos os grandes problemas no sistema solo-água, de modo que a compactação diminui a

condutividade hidráulica saturada do solo, diminui a taxa de infiltração de água e aumenta o escoamento superficial (LIPIEC & HATANO, 2003).

Collares (2005) afirma que a compactação residual causada por quatro passadas de máquina de 10 toneladas, após um ano, reduz a retenção de água no solo até à tensão de 6 kPa, para a camada de 10-15 cm e até 33 kPa, para a camada de 15-20 cm, em relação ao plantio direto há doze anos e escarificação em argissolo vermelho distrófico arênico. O autor ainda relata que a compactação adicional causada pelo tráfego de máquina de 10 toneladas elevou os valores de densidade do solo e reduziu a porosidade total pela diminuição da macroporosidade. Lipiec & Hatano (2003) relataram que em oitos passagens de trator sobre o solo, reduziu a macroporosidade de 13,4 para 5,6% de volume.

Alves et al. (2005) avaliaram o efeito da compactação subsuperficial na redução da taxa de infiltração de água no solo, utilizando o método dos anéis concêntricos. Eles observaram taxa constante de infiltração de água no solo no valor de 116,50 cm h⁻¹, em área de mata, e 8,48 e 9,52 cm h⁻¹, em área recém-preparada convencionalmente e preparada há nove meses, respectivamente. Esses resultados demonstram o forte impacto da compactação na estrutura física do solo, ocasionando graves problemas de infiltração.

A camada de solo que causa maior restrição para o crescimento das raízes, em áreas de plantio direto está na faixa de 0,07 e 0,15 m (SECCO et al., 2009; DRESCHER et al., 2011). Desse modo a camada acima de 0,07 m no solo apresenta-se em melhores condições de porosidade. Isso ocorre em virtude da maior concentração radicular, matéria orgânica, maior atividade biológica, mais ciclos de umedecimento e secagem e da descompactação promovida pelas semeadoras/adubadoras (DRESCHER, 2015). A autora também comenta que na camada abaixo (entre 0,07 e 0,15 m) a taxa de compactação causada pelas pressões sucessivas aplicadas pelo rodado das máquinas é maior que a taxa de descompactação promovida pelos agentes que atuam mais efetivamente na superfície do solo, implicando, assim, em aumento do grau de compactação nessa camada de solo.

Analisando o histórico de manejo do solo no Brasil e mais especificamente no Rio Grande do Sul, essa situação é agravada pelo já existente “pé de arado” na camada subsuperficial dos solos, originária do período sob intensivo manejo convencional. Segundo Silva (2003) o “pé de arado” ocorre abaixo da camada arável, que é a aproximadamente 20 cm de profundidade, e impede ou dificulta a drenagem mais profunda no solo. Como consequências da presença de camadas compactadas no solo sob plantio direto, tem-se o aumento do escoamento superficial, aumento da perda de solo e nutrientes e diminuição da taxa de infiltração de água no solo, e conseqüente diminuição da disponibilidade de água para

as plantas e para recarga do lençol freático, sendo o conteúdo de água no solo o principal fator afetado pelo processo de compactação. Esse assunto será abordado no subitem a seguir.

4.2 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A redução da taxa de infiltração tem como principal consequência elevadas perdas de água pelo aumento do escoamento superficial. A água escoada superficialmente irá infiltrar em outro local, ou se perder em determinado corpo hídrico. Esse processo de perda de água é acelerado pelas áreas impermeáveis das cidades, e pela má qualidade física dos solos nas áreas agrícolas, sendo fundamental para a formação de enchentes e alagamentos, gerando inúmeros problemas ambientais, sociais e econômicos.

As características da precipitação, do relevo, tipo de solo, uso e manejo do solo controlam a dinâmica do escoamento superficial. O processo é basicamente controlado pela infiltração de água no solo em função da intensidade da chuva e, também pela taxa de infiltração de água no solo que varia em função do tempo (HILLEL, 1998). Esse processo é conhecido como escoamento do tipo Hortoniano, ou seja, controlado pela taxa de infiltração. As principais características do solo que controlam o processo são a macroporosidade e o conteúdo inicial de água no solo. Assim, o escoamento superficial, depende da precipitação, da taxa básica de infiltração, e também das características da superfície (relevo e vegetação) que definirá a propagação do escoamento.

Duas teorias são utilizadas para descrever a variabilidade temporal e espacial da formação do escoamento. A primeira delas, e, anteriormente mencionada, é o mecanismo hortoniano (Horton, 1945), que ocorre quando a taxa de precipitação excede a taxa de infiltração do solo. A segunda são as áreas de afluência variável (Beven e Kirkby, 1979), onde ocorre a saturação do perfil do solo por diferentes razões e as precipitações subsequentes ocasionam o escoamento superficial. O controle do escoamento superficial pelo aumento da infiltração tem outras vantagens importantes, como o suprimento de água para o desenvolvimento das plantas, manutenção da vazão de base dos rios e o reabastecimento de aquíferos subterrâneos.

O aumento do escoamento superficial, gera também maior perda de solo, uma vez que o aumento da enxurrada resulta no aumento do poder em desagregar e transportar as partículas de sedimento que, quando combinado a cobertura vegetal e manejo do solo inadequado, promovem a degradação desses ambientes rurais. Recentemente, segundo Didoné et al. (2014), muitos problemas de erosão têm sido observados em áreas de cultivo por

semeadura direta no sul do Brasil, pela insuficiência de resíduos vegetais, retirada de estruturas de controle do escoamento superficial (terraços), cultivos morro abaixo-morro acima e pela compactação do solo.

Fundamentalmente, o processo de erosão hídrica do solo pela água da chuva é condicionado pelos fatores chuva, solo, topografia, cobertura, manejo e práticas conservacionistas de suporte (HUDSON, 1977). A ausência dessas práticas conservacionistas e de uma política de incentivo são hoje a principal responsável pelas perdas de água, solo, nutrientes e matéria orgânica nas áreas rurais, principalmente aquelas de relevo ondulado.

Muller (1995) ressalta que a erosão é problema de duas faces: a primeira deve-se ao fato de a mesma dilapidar camadas férteis de solos, prejudicando terrenos utilizados para agricultura; e a segunda quanto à deposição dos materiais erodidos em leitos de rios e reservatórios interferindo nas funções e utilizações dos mesmos. Do mesmo modo, Branco et al. (1998) citam que os processos erosivos removem as camadas superficiais dos solos reduzindo a produtividade dos mesmos e que os sedimentos originados desses processos, além de prejudicar a qualidade das águas, servem como veículo a outros poluentes (como fertilizantes ou produtos químicos) que são carreados a estes materiais.

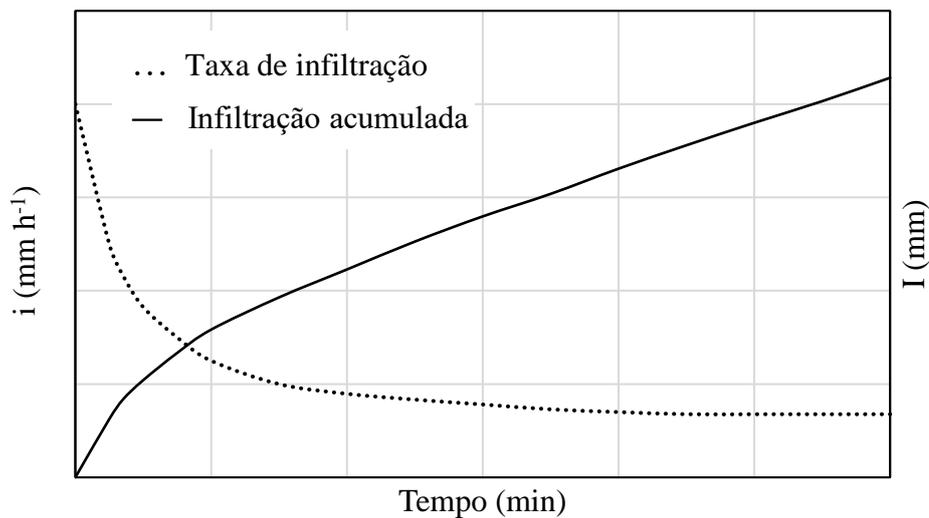
Os processos erosivos também provocam outros problemas em cursos d'água e reservatórios, como: aumento dos custos de tratamento de água, desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água, danos no crescimento e desenvolvimento de espécies aquáticas (devido à turbidez da água e redução da capacidade de propagação da luz, entre outros), diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios e conseqüente redução do potencial de geração de energia elétrica (BARROSO & SILVA, 1992).

4.3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração de água no solo como abordado anteriormente, é fortemente influenciada pela estrutura dos poros e densidade do solo que influenciam a condutividade hidráulica saturada e não saturada do solo. Assim como outros processos, ela é vital para o equilíbrio do meio natural. Em períodos de chuva ou irrigação, a infiltração inicialmente assume valor elevado, diminuindo com o tempo. Desse modo sob chuva ou irrigação contínuas, a taxa de infiltração se aproxima, gradualmente, do valor mínimo e constante, conhecido por taxa de infiltração básica (i) (SOBRINHO et al., 2003). A i representa a quantidade de água que o solo em determinada condição é capaz de absorver na unidade de área por unidade de tempo,

sendo expressa em mm h^{-1} . A figura 1 ilustra o comportamento da taxa de infiltração e da infiltração acumulada de água no solo em função do tempo.

Figura 1 – Representação da taxa de infiltração (i) e infiltração acumulada (I) no tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Chaves et al. (1993) relatam que o impacto das gotas de chuva contribui para a redução da taxa de infiltração, pois esse impacto reduz a rugosidade superficial, e conseqüentemente a capacidade de retenção do escoamento superficial, assim como aumenta a densidade na camada superficial. Esse processo recebe o nome de selamento superficial que, depois de estar seca, torna-se crosta superficial, podendo reduzir a condutividade do solo em até 90%. Esses aspectos mencionados evidenciam a importância do manejo adequado do solo para favorecer a infiltração de água, especialmente pela manutenção de camada de palha sobre o solo.

Silva e Kato (1998) verificaram que quando o solo estava sem cobertura vegetal a infiltração média foi menor que na presença de cobertura vegetal sobre o solo. Avaliando a infiltração de água no solo em diferentes sistemas de manejo, Sobrinho et al. (2003) verificaram que em solo sob SPD a taxa de infiltração básica variou entre os tratamentos (soja, seguida de cultivo de nabo forrageiro (Trat1); soja, seguida de cultivo de aveia (Trat2); soja, seguida de pousio (Trat3)) na ordem de 31,5, 45,1 e 22,6 mm h^{-1} , respectivamente enquanto que em sistema convencional a taxa de infiltração básica foi de 14,5 mm h^{-1} .

Segundo os autores a palha sobre a superfície do solo ajuda no processo de umedecimento desse solo, e diminui e retarda as perdas por evaporação.

É evidente que quando comparado ao sistema convencional, o SPD se destaca como sistema de manejo mais bem-sucedido para as regiões tropicais, entretanto, ainda é insuficiente em termos de ganho na taxa de infiltração de água no solo para promover a melhoria nas condições ambientais. Bernardi (2011) estudando a i de água em solo da unidade de mapeamento Santo Ângelo no município de Jóia, verificou que duas lavouras sob SPD, uma com 20 anos de uso agrícola e outra com 40 anos de uso, sendo os 20 primeiros sob sistema convencional e os outros 20 anos em SPD, que a i média foi de 6,9 e 6,1 mm h⁻¹ respectivamente, enquanto que em área próxima sob floresta nativa a i média foi de 217,1 mm h⁻¹. Segundo o autor esse comportamento pode ser atribuído principalmente às alterações ocorridas na estrutura do solo pelo cultivo e pela redução do percentual da matéria orgânica (da floresta para as lavouras), reduzindo a macroporosidade do solo, com efeito direto na taxa de infiltração básica. Fontenele (2006) avaliando a infiltração de água no solo demonstrou que as maiores taxas obtidas de infiltração de água no solo, ao fim de duas horas, ocorreram em área de cerrado nativo com 35,60 cm h⁻¹ e área recém-desmatada 28,10 cm h⁻¹. Por outro lado, as menores taxas de infiltração ocorreram no sistema plantio direto com 8,67 cm h⁻¹ e no plantio convencional com 5,73 cm h⁻¹.

Essa degradação na qualidade hídrica do solo se deve aos muitos fatores que influenciam na infiltração de água no solo, entre os quais se pode citar: (i) características físicas do solo, como textura e estrutura, onde quanto mais arenosa a textura, maior o número de macroporos e maior a taxa de infiltração, e solos bem estruturados apresentam melhores condições de infiltração do que solos pouco estruturados; (ii) cobertura vegetal, a matéria orgânica favorece a infiltração e, além disso, a cobertura vegetal impede o selamento superficial; (iii) tipo de preparo e manejo do solo; (iv) conteúdo inicial de água no solo; e (v) a topografia do terreno. Também cabe ressaltar, que solos estratificados apresentam comportamento diferente daqueles de perfil homogêneo. Segundo Klar (1984) solos que apresentam camada de textura mais grosseira sobre outra mais fina, terão a taxa de fluxo inicialmente controlada pelo diâmetro dos poros do solo arenoso, mas, quando a frente de molhamento atingir a camada argilosa, a taxa de infiltração decresce e tende a ser semelhante à que teria o solo, se tivesse o perfil somente argiloso.

O conteúdo de água no solo é normalmente definido como o conteúdo de água na zona não saturada do solo (HILLEL, 1998). Na prática, frequentemente, apenas uma fração do solo é usada para a determinação do conteúdo de água no solo. Esse valor é considerado em

relação a determinado volume de solo (SENEVIRATNE et al., 2010). O conteúdo volumétrico de água no solo θ [$\text{cm}^3_{\text{H}_2\text{O}}/\text{cm}^3_{\text{solo}}$] no volume de solo é definido pela equação 1:

$$\theta = \left(\frac{\text{volume de água}}{\text{volume de solo}} \right) \quad (1)$$

A equação 1 é aplicável a múltiplas escalas que variam desde a poucos centímetros cúbicos, até a quilômetros cúbicos, dependendo do método de determinação ou pesquisa aplicada (SENEVIRATNE et al., 2010). Ainda segundo o autor, outra questão com a definição do conteúdo de água no solo, é a caracterização do volume de solo (V) na equação 1. Pois a água não é homogeneamente distribuída verticalmente e horizontalmente, e, portanto, é diferente para diferentes volumes de solo.

Partindo desses conceitos, para a determinação do conteúdo de água no solo, os pesquisadores empregaram várias técnicas ao longo das últimas décadas, que podem ser classificadas em (i) técnicas clássicas e (ii) técnicas modernas, tanto para determinações em laboratório quanto a campo (SU et al., 2014). As técnicas clássicas incluem a técnica termogravimétrica e a de carbureto de cálcio (ROBINSON et al., 2008; TERHOEVEN-URSELMANS et al., 2008), enquanto as técnicas modernas utilizam sensores de resistividade do solo, tensiômetros (RIDLEY & BURLAND, 1993; SINGH et al., 2002), reflectometria no domínio do tempo (TDR) e técnicas de capacitância (FDR).

As determinações clássicas envolvem a remoção da água da amostra de solo por evaporação ou reação química. A técnica termogravimétrica é amplamente utilizada e tem sido empregada como o padrão de referência para a determinação do conteúdo de água em amostras de solo. A desvantagem dessa metodologia é que ela é destrutiva, em relação ao solo, não podendo ser utilizada em experimentos controlados. As técnicas modernas empregam propriedades elétricas no solo (constante dielétrica, impedância, capacitância e resistividade do solo), potencial de água no solo, raios infravermelhos e técnicas radioativas como a sonda de nêutrons (SU et al., 2014). Esse último nos últimos anos vem sendo cada vez menos usada devido aos riscos com a radiação. Essas técnicas possuem como limitações o alto custo dos equipamentos e no caso específico das sondas TDR, FDR e tensiômetros em condições onde o solo é duro ou pedregoso, medições utilizando essas técnicas podem até ser impossíveis (ROBINSON et al., 2012).

Briggs (1987) fez significativas contribuições para o entendimento das interações da umidade do solo. O autor relatou que o conteúdo de água no solo existe em três formas,

gravitacional, capilar e higroscópico. O conteúdo de água gravitacional é definido como a água livre que se move no solo devido à força da gravidade. É encontrada nos macroporos e o seu movimento é rápido em solos bem drenados (SU et al., 2014). O conteúdo capilar é a água que está presente nos microporos do solo e é retido pelas forças de coesão e adesão contra a força da gravidade. Segundo Su et al., (2014) a água capilar é responsável por todas as interações físicas, químicas, mineralógicas e biológicas entre o solo e o ambiente. O conteúdo hidrosférico, segundo os autores forma uma espécie de película muito fina em torno da superfície das partículas de solo. Logo, ela não está nos poros do solo, mas sim na superfície dessas partículas, e é muito difícil de remover devido à presença elevada das forças de adesão, sendo que os solos argilosos retêm mais água hidrosférica em comparação com solos arenosos, devido à sua maior área superficial.

Para entender as interações água-plantas, Widtsoe & Mclaughlin (1912) diferenciaram a *umidade capilar* em: capacidade de campo e ponto de murcha. Capacidade de campo é a água retida no solo após o solo ter sido saturado e a drenagem ter ocorrido, ou que a força gravitacional tenha deixado de predominar sobre o fluxo de água no solo. Ponto de murcha é o conteúdo de água no solo do qual abaixo as plantas começam a murchar. Já a água disponível para as plantas é a água do solo que pode ser absorvida pelas raízes das plantas e seu valor pode ser obtido subtraindo-se o ponto de murcha da capacidade de campo.

Buckingham (1907) e Gardner (1920) realizaram estudos iniciais sobre a quantidade de água em relação ao nível de energia com o qual a água é retida no solo (potencial matricial), e essa relação é conhecida como curva de retenção de água no solo (SWRC sigla do inglês *Soil Water Retention Curve*) ou curva característica de água no solo. A SWRC reflete as propriedades fundamentais de drenagem em solos não saturados, revelando a relação entre a sucção no solo e o conteúdo de água (SATTARI & TOKER, 2016), e é frequentemente usada para prever o conteúdo de água no solo, capacidade de campo e ponto de murcha (SU et al., 2014). Ela também é usada para compreender as características do solo seco e úmido e a estrutura dos poros (PHAM, et al., 2005). De acordo com Fredlund et al. (2012) os processos de estimativa para a obtenção das propriedades do solo não saturado, por meio da SWRC, são métodos que definem valores aproximados, mas são geralmente satisfatórios para a análise dos processos na mecânica dos solos.

O conhecimento do conteúdo de água no solo é fundamental para estudos em diferentes áreas de conhecimento, e sua relação com as propriedades físicas do solo é essencial para estudos de balanço hídrico. Essa determinação tem fundamental importância para os ciclos da água e energia. Além disso, está ligada a ciclos bioquímicos (por exemplo,

ciclos do carbono e nitrogênio) por meio da transpiração e fotossíntese das plantas (SENERIVATNE et al., 2010). Como abordado nesse tópico, o conteúdo de água no solo está diretamente ligado a sucção do solo, ou seja, a força com que a água é retida na matriz do solo, denominado potencial matricial de água no solo. Com a redução do conteúdo de água no solo, a sucção do solo aumenta, tornando a água remanescente menos disponível para a absorção pelas raízes das plantas, e a evapotranspiração pode também tornar-se reduzida.

4.4 MÉTODOS MECÂNICOS DE CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E SOLO

O panorama de má gestão do solo e das áreas de cultivo aliado à alta suscetibilidade de degradação ambiental da região Sul do Brasil torna necessário que nessas áreas de uso agrícola o SPD seja praticado na plenitude de seus princípios básicos, objetivando conter o potencial erosivo e maximizar o armazenamento de água. Nesse contexto, o uso, desenvolvimento e avaliação de práticas conservacionistas do solo e da água devem contribuir para minimizar os problemas relacionados a esses processos.

Para Dionisio (2010) o uso de práticas conservacionistas que aumentem a infiltração e o armazenamento da água no perfil do solo, que intensifiquem a cobertura vegetal e reduzam o escoamento superficial, é recomendável. Desse modo, além de diminuir ou evitar a erosão e a perda de fertilidade do solo obtém-se melhorias da qualidade da água e a preservação da vida silvestre e do meio ambiente (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012). Várias são as técnicas utilizadas para conter a erosão hídrica em solos agrícolas, normalmente divididas em práticas edáficas, vegetativas e mecânicas, as quais apresentam sua eficiência potencializada quando usadas de forma integrada (MAGALHÃES, 2013). O uso indiscriminado de somente parte dessas práticas conservacionistas pode mascarar os efeitos da degradação em curto prazo.

A eficiência da semeadura direta na redução das perdas de solo, quando comparada ao sistema convencional, fez com que os agricultores abandonassem as práticas mecânicas de controle das perdas de água e solo, como, por exemplo, os terraços. Essa atitude aumentou as perdas de solo e água, e vem degradando cada vez mais os solos dessas áreas. Para Denardin et al. (2008) a partir de determinado comprimento de rampa, a energia cisalhante do escoamento superficial pode superar a tensão crítica de cisalhamento imposta pela cobertura vegetal do solo e permitir a flutuação e o transporte dos restos culturais, bem como, a erosão entre sulcos e, ou, em sulcos sob a cobertura. Assim, o não uso de práticas de controle do escoamento superficial, além de contribuir com as perdas de água e solo, promove o arraste da

cobertura vegetal, diminuindo a eficiência dessa em absorver a energia cinética do impacto das gotas de chuva.

Os métodos mecânicos de conservação de água e solo (MMCAS) são usados há bastante tempo em vários lugares do mundo, exemplo terraços e diques de contorno. O objetivo dos MMCAS é tanto reduzir o escoamento superficial e a perda de solo, como as consequências externas dessas perdas como o assoreamento dos reservatórios, a deterioração da qualidade da água e as inundações (OWENS et al., 2005; VANMAERCKE et al., 2011).

Pesquisas recentes também demonstram a importância dos MMCAS na conservação dos ecossistemas presentes no solo (MAETENS et al., 2012), e seu papel nos ciclos biogeoquímicos incluindo o sequestro de carbono (CONLEY, 2000). Considerando que a atuação dos MMCAS na redução da perda de solo é bem reconhecida (MORGAN, 2005; BOARDMAN & POESEN, 2006), ainda há necessidade de integrar efetivamente os conhecimentos sobre os MMCAS em boas práticas de gestão.

Segundo Maetens et al. (2012) a medida mais utilizada para quantificar a eficácia dos MMCAS na redução de perdas de água e solo é a análise de proporção, isto é, a proporção das perdas de água e solo em área com MMCAS em comparação com a área de referência, que tem as mesmas características, mas sem o uso dos MMCAS. Desse modo, para a quantificação da eficiência do método mecânico de conservação da água e solo há a necessidade de determinações locais (HESSEL & TENGE, 2008).

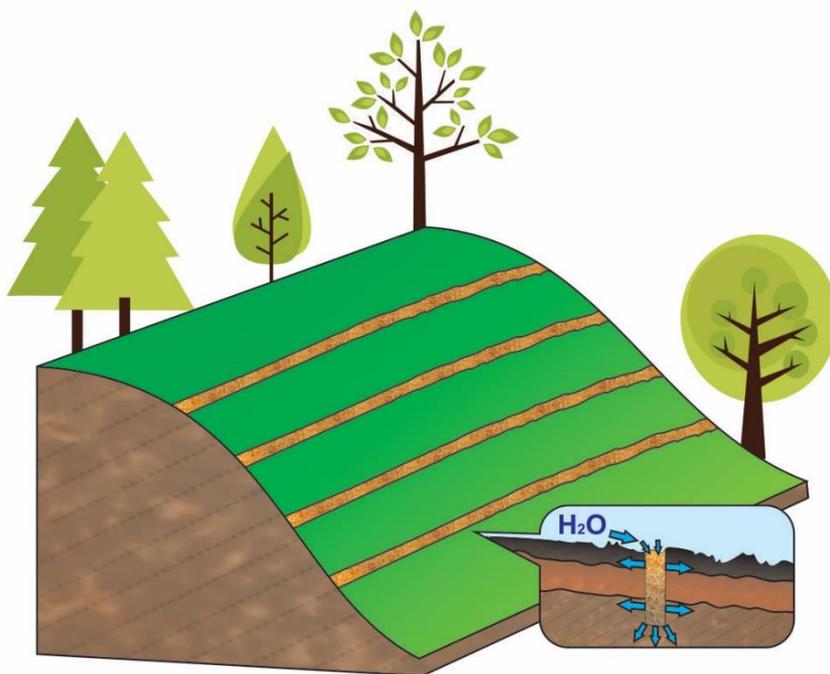
Há também fortes indícios de que a eficácia dos MMCAS depende de vários fatores ambientais como o uso do solo, propriedades físicas do solo, frequência e duração das chuvas (HESSEL & TENGE, 2008), declividade e comprimento da rampa (GILLEY & RISSE, 2000; SMETS et al., 2008). No entanto poucas avaliações quantitativas dos efeitos desses fatores ambientais, sobre a eficácia dos MMCAS no controle das perdas de água e solo foram realizados, limitando também a incorporação da aplicação dos MMCAS em modelos de erosão e hidrológicos (MAETENS et al., 2012).

Em áreas tropicais e subtropicais como o sul do Brasil, apesar da boa distribuição das chuvas ao longo do ano, podem ocorrer chuvas torrenciais em curtos períodos de tempo, ultrapassando facilmente a capacidade de infiltração de água no solo. Além disso, solos com impedimentos à infiltração ou aqueles com lençol freático próximo à superfície podem gerar escoamento superficial, mesmo em chuvas de baixa intensidade, mas de longa duração (TIECHER & MINELLA, 2015). Essas condições implicam no maior conhecimento dos processos naturais e no teste de maior número de práticas conservacionistas a serem aplicadas, visando atender o mais próximo possível as condições ambientais de cada local.

Segundo Guerra et al. (2014) a escolha dos métodos e práticas de prevenção à erosão é realizada em função dos aspectos ambientais e socioeconômicos de cada propriedade ou região. Assim, ações orientadas à quantificação da magnitude dos problemas hidrológicos e erosivos são de relevância para subsidiar a qualificação do SPD. Assim como a implementação, aperfeiçoamento e o desenvolvimento de práticas conservacionistas complementares à cobertura de solo, como meio para a efetiva melhoria das condições ambientais e para a sustentabilidade da agricultura nas regiões do Sul do Brasil.

Como técnica alternativa para o controle do escoamento superficial e aumento da infiltração de água nas áreas de cultivo agrícola no sistema plantio direto tem-se o método do *vertical mulching*. Segundo Righes et al. (2002) essa tecnologia consiste em abrir sulcos no solo, em nível, perpendicularmente ao declive, preenchendo-os com palha para mantê-los abertos. A figura 2 ilustra esse método. Dessa forma com a utilização de material mais poroso no perfil do solo, desde a sua superfície, é desejado que o fluxo de água para dentro do solo aumente.

Figura 2 – Representação do método *vertical mulching*.



Um dos primeiros estudos realizados avaliando o *vertical mulching* em solos no Brasil foi o elaborado por Nishijima & Righes (1987) em solo podzólico vermelho-amarelo com textura média, na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Os autores verificaram que o sistema com *vertical mulching* em parcelas de preparo convencional, com 10 m de espaçamento entre sulcos, reduziu o escoamento superficial em até 52% em relação ao preparo convencional sem o uso do *vertical mulching*. Foi constatado também que o sistema com VM proporcionou maior infiltração de água da chuva no solo e maior armazenamento quando comparado a outros sistemas de manejo.

Garcia & Righes (2008) verificaram na cidade de Passo Fundo que o *vertical mulching* em latossolo vermelho distrófico típico com alto teor de argila (em torno de 600 g kg⁻¹) em semeadura direta ocasionou reduções no escoamento superficial em até 48,6% com espaçamento de 10 m entre os sulcos, em relação ao mesmo sistema sem o VM.

Dalla Costa (2004) verificou diminuição em até 67% no escoamento superficial em função do espaçamento entre os sulcos e das intensidades da chuva. O autor também verificou que as concentrações de nutrientes analisadas na água do escoamento superficial, não diferiram entre os tratamentos (sistema plantio direto com e sem *mulching*). O autor verificou que independente do estágio de desenvolvimento da cultura na área a média escoada no tratamento sem o *vertical mulching* foi sempre o dobro com relação aos tratamentos com espaçamento entre sulcos de 5 e 10 metros para intensidade de chuva de 106 mm h⁻¹.

Denardin et. al (2008) constataram que o uso da técnica *vertical mulching* reduziu o índice de enriquecimento de sedimentos e preveniu o transporte de sedimento quimicamente enriquecido para fora da lavoura. Os autores verificaram que o sulco do método VM retém o sedimento prevenindo possível contaminação de mananciais de superfície. Essas informações colaboram com o conhecimento empírico, oriundo das observações a campo, de que a adoção do sistema plantio direto, sem práticas conservacionistas complementares à cobertura permanente de solo para manejo de enxurrada, não representa manejo conservacionista de solo capaz de prevenir a degradação ambiental.

Os estudos encontrados na literatura, com relação ao uso do método VM, se concentram em analisar os aspectos hidrológicos, principalmente a influência na contenção do escoamento superficial, e de perda de nutrientes na enxurrada. Não há estudos analisando o impacto que esse método pode causar na distribuição de água no solo e que abordem profundamente o espaçamento ideal entre sulcos a fim de evitar o escoamento superficial para chuvas intensas.

Desenvolver métodos de conservação de água e solo que atendam às necessidades dos agricultores com a manutenção do equilíbrio ambiental, torna-se necessidade atual por métodos eficientes e de aplicação viável. Nas últimas décadas o descaso observado com o solo nas áreas de produção agrícola é problema que deve ser solucionado com a ampliação de estudos e viabilização de técnicas apropriadas.

Nos estudos encontrados na literatura o *vertical mulching* apresentou potencial em diminuir o escoamento superficial e perdas de nutrientes na enxurrada. Essa técnica apresenta como vantagem, quando comparada a outros métodos mecânicos, a manutenção da velocidade de semeadura e da colheita. Por outro lado, existem ainda incertezas sobre a aplicabilidade do método que precisam de maior investigação. Estudos avaliando a magnitude de propagação da água no solo e o espaçamento ideal entre sulcos para condições de chuvas intensas são investigações necessárias para melhor compreensão do método.

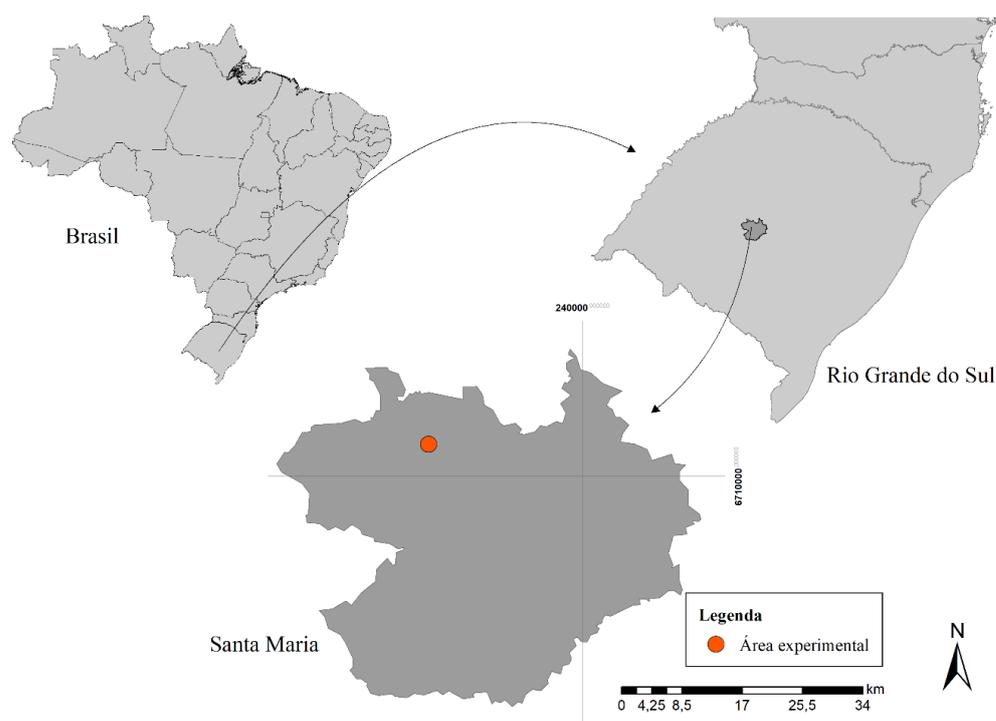
5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

5.1.1 Local do estudo

O experimento foi desenvolvido no Centro de Pesquisa em Florestas da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO – Florestas) localizada no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul (latitude: 29°41'24"S, longitude: 53°48'42"O; elevação: 153 m) (figura 3). O experimento está instalado em solo franco arenoso pertencente à unidade de mapeamento São Pedro. O clima da região é subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen–Geiger, caracterizado pela ocorrência de precipitações bem distribuídas ao longo dos 12 meses do ano, com totais anuais variando entre 1700 mm a 1800 mm e evapotranspiração potencial total anual variando entre 700 e 900 mm. A temperatura média diária oscila entre 30,4°C no verão e 9,4°C no inverno, com média ao longo do ano de 19,3°C.

Figura 3 – Localização do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

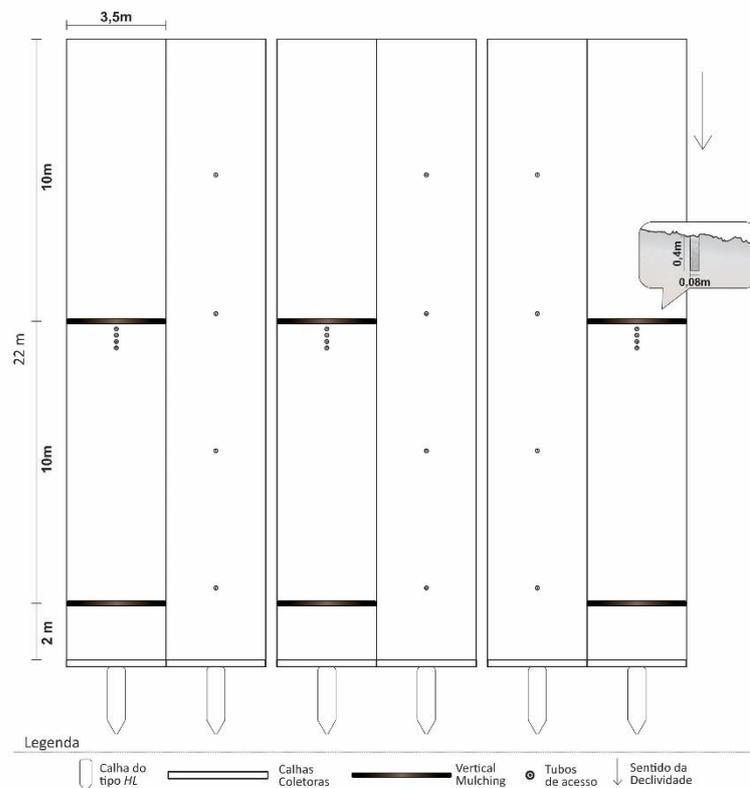
5.1.2 Design do experimento

Para alcançar os objetivos e responder à pergunta central do estudo foram realizados alguns experimentos de campo, cujos dados foram utilizados para construir e calibrar os modelos que estão descritos detalhadamente nos itens 5.5 e 5.6. Outra abordagem possível seria realizar inúmeros experimentos de campo com várias configurações de parcelas (tratamentos). Entretanto, a abordagem escolhida tem como vantagens o menor custo com aquisição e instalação de equipamentos, menos tempo gasto a campo e maior flexibilidade, já que a modelagem permite testar uma variedade de situações que a campo seriam inviáveis financeiramente e em prazo de tempo.

Os experimentos foram constituídos de dois tratamentos com três repetições em delineamento experimental de blocos ao acaso, totalizando seis parcelas experimentais. Os tratamentos são: T_{com} – sistema plantio direto com vertical mulching; e T_{sem} – sistema plantio direto sem vertical mulching (testemunha). Como cultura de inverno foi realizada a semeadura de azevém (*Lolium multiflorum*) e aveia preta (*Avena strigosa*). Como cultura de verão foi semeada a soja (*Glycine max*).

Cada parcela possui dimensões de 3,5 m de largura e 22 m de comprimento, totalizando 77,0 m². Foram instaladas em solo franco arenoso com 7% de declividade. Para evitar o deslocamento lateral do escoamento superficial entre as parcelas, foram introduzidas no solo chapas de ferro até a profundidade de 10 cm de modo que 20 cm foram deixados acima da superfície. Na extremidade das parcelas com menor declividade foram instaladas calhas metálicas para a coleta do escoamento superficial com a função de direcionar o fluxo d'água para as calhas medidoras do tipo *HL*. Na figura 4 é ilustrada a representação do experimento.

Figura 4 – Representação das parcelas experimentais e tratamentos.



Fonte: Grupo de pesquisa em recursos hídricos e saneamento ambiental – GHIDROS.

Os sulcos do vertical mulching foram abertos perpendicularmente ao declive com dimensões de 0,08 m de largura por 0,40 m de profundidade. Após a abertura dos sulcos eles foram preenchidos manualmente com palha de resíduos secos da vegetação do próprio local. A palha foi compactada de forma a proporcionar estabilidade às paredes do sulco. Em T_{com} foram construídos dois sulcos com 10 m de espaçamento. O último sulco está localizado a 2 m acima da calha coletora do escoamento superficial. Os blocos formados por dois tratamentos estão separados entre si por 0,6 m. Na figura 5 é ilustrado o conjunto experimental.

O espaçamento de 10 m entre os sulcos do vertical mulching foi adotado como ponto inicial para a análise do espaçamento entre sulcos e principalmente obtenção dos dados de entrada dos modelos. Se fossem adotados espaçamentos menores (por exemplo 3, 5 ou 7 m) poderia não haver escoamento superficial nas parcelas, mesmo para diferentes intensidades de precipitação, não gerando dados suficientes para a calibração e validação dos modelos.

Figura 5 – Conjunto experimental. a) parcelas; b) detalhe do sulco do vertical mulching; c) e d) detalhes das calhas coletoras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

5.2.1 Densidade, porosidade e textura do solo

Foram caracterizados densidade do solo, microporosidade, macroporosidade, porosidade total e textura do solo. Com o objetivo de caracterizar as camadas de leitura do conteúdo de água no solo (item 5.4.4), foram coletadas amostras não deformadas em anéis cilíndricos com diâmetro médio de 5 cm e 3 cm de altura com quatro repetições por camada. As camadas amostradas foram: 0,00 - 0,18; 0,18 - 0,36; 0,36 - 0,54; 0,54 - 0,72; 0,72 - 0,90; 0,90 - 1,08; 1,08 - 1,26; 1,26 - 1,44; 1,44 - 1,62; 1,62 - 1,80 e 1,80 - 1,98 m de profundidade. As amostras deformadas foram coletadas em sacos plásticos para determinação da textura do solo. As análises foram realizadas pelo laboratório de física do solo do Sistema Irriga, vinculado a Universidade Federal de Santa Maria seguindo metodologias descritas por EMBRAPA (1997).

Para a densidade do solo as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constante para determinação conforme equação 2 descrita por EMBRAPA (1997):

$$DS = \frac{MS}{V_{solo}} \quad (2)$$

sendo DS a densidade do solo (g cm^{-3}), MS a massa de solo seco (g) e V_{solo} o volume da amostra de solo (cm^3).

A porosidade do solo foi determinada pela equação 3:

$$PT = \frac{Psat - Psec}{V_{solo}} \cdot 100 \quad (3)$$

sendo PT porosidade total (% de volume), $Psat$ a massa do solo saturado (g), $Psec$ a massa do solo seco e 100 o fator de conversão em porcentagem.

A macroporosidade corresponde o conteúdo volumétrica de água quando a amostra se encontra na tensão de 6 kPa, determinada pela equação 4 (EMBRAPA, 1997):

$$Macro = \frac{Psat - P6kPa}{V_{solo}} \cdot 100 \quad (4)$$

sendo $Macro$ a macroporosidade (% de volume) e $P6kPa$ a massa de água na amostra com tensão de 6 kPa (g).

A microporosidade corresponde à diferença entre a porosidade total e a macroporosidade, conforme equação 5 e descrito por (EMBRAPA, 1997):

$$Micro = PT - Macro \quad (5)$$

sendo $Micro$ a microporosidade do solo (% de volume).

A determinação da análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta para as frações de argila (EMBRAPA, 1997) considerando-se a lei de Stokes. A separação da fração areia ocorre por tamisamento. O silte é a diferença entre as massas de areia e argila total.

5.2.2 Curvas de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo (SWRC do inglês *soil water retention curve*) é importante para o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, em especial para a dinâmica de água e solutos no solo. Para esse estudo os dados da SWRC foram utilizados no modelo de distribuição de água no solo (seção 5.6).

A coleta das amostras seguiu conforme procedimento descrito no item anterior. Foram utilizadas as mesmas amostras não deformadas coletadas em anéis volumétricos com quatro repetições para todas as onze camadas amostradas. As análises foram realizadas no laboratório do Sistema Irriga vinculado a Universidade Federal de Santa Maria. Para as tensões de 1 e 6 kPa foi utilizado a técnica da mesa de tensão conforme descrito por EMBRAPA (1997) e para as tensões de 10, 33 e 100 kPa foi utilizada a técnica da panela de pressão de Richards seguindo metodologia descrita por Richards (1965). Após os ensaios de laboratório e com o conjunto de dados de tensão (em kPa) e conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foram elaboradas curvas de regressão potencial para obter as equações da SWRC para cada camada. As equações potenciais que representam a SWRC em cada profundidade são da forma da equação 6a segundo Gardner et al. (1970):

$$\Psi_m = a \cdot \theta^{-b} \quad (6a)$$

sendo Ψ_m o potencial matricial (kPa), θ o conteúdo de água no solo (ou $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e a e b são parâmetros de ajuste.

Equação similar é apresentada por Campbell (1985):

$$\Psi_m = \Psi_e \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \quad (6b)$$

sendo Ψ_e a entrada de ar potencial ou potencial matricial crítico e θ_s a umidade de saturação do solo. Ψ_e pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\Psi_e = a \cdot \theta_s^{-b} \quad (6c)$$

5.2.3 Teste de drenagem

Foram realizados testes de drenagem seguindo a metodologia tradicional descrita por Veihmeyer & Hendrickson (1931, 1949) onde os autores introduziram o conceito de capacidade de campo. Com esse experimento, ao contrário daquele feito pelos autores citados, não se objetivou obter o valor de aparente equilíbrio de água no solo e sim de conhecer o máximo de água que pode ficar retido no solo após “n” horas. Essa informação foi utilizada para o conhecimento do solo estudado e definição dos valores de conteúdo inicial de água no solo requeridos como parâmetros de entrada no modelo de Green e Ampt (1911) que está detalhado no item 5.5.1.

Para isso foi delimitada área de 1 m² com superfície livre de vegetação, por meio de diques de 10 cm de altura construídos com solo do próprio local (figura 6a). No meio dessa área foi instalado um tubo de acesso de acrílico para realização de leituras do conteúdo de água no solo com uso da sonda TDR do tipo móvel (figura 6a) (A descrição da sonda TDR e a metodologia de determinação do conteúdo de água no solo estão detalhados no item 5.4.4). Nesse local foi mantida lâmina de água de 10 cm de altura por 24 horas, objetivando atingir a máxima saturação possível do solo (figura 6b). Após 24 horas foi retirada a lâmina de água e a área delimitada foi coberta por lona plástica a fim de evitar perdas por evaporação (figura 6c). Após o solo ser coberto pela lona foram realizadas determinações do conteúdo de água nos tempos de 5 minutos, 2, 4, 8, 12, 24, 32, 48 e 72 horas. As camadas monitoradas foram 0,00 - 0,18; 0,18 - 0,36; 0,36 - 0,54; 0,54 - 0,72 e 0,72 - 0,90 m de profundidade.

Figura 6 – Teste de drenagem. a) área preparada para o experimento; b) lâmina d’água aplicada com altura de 10 cm; c) cobertura do local por lona plástica para evitar evaporação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

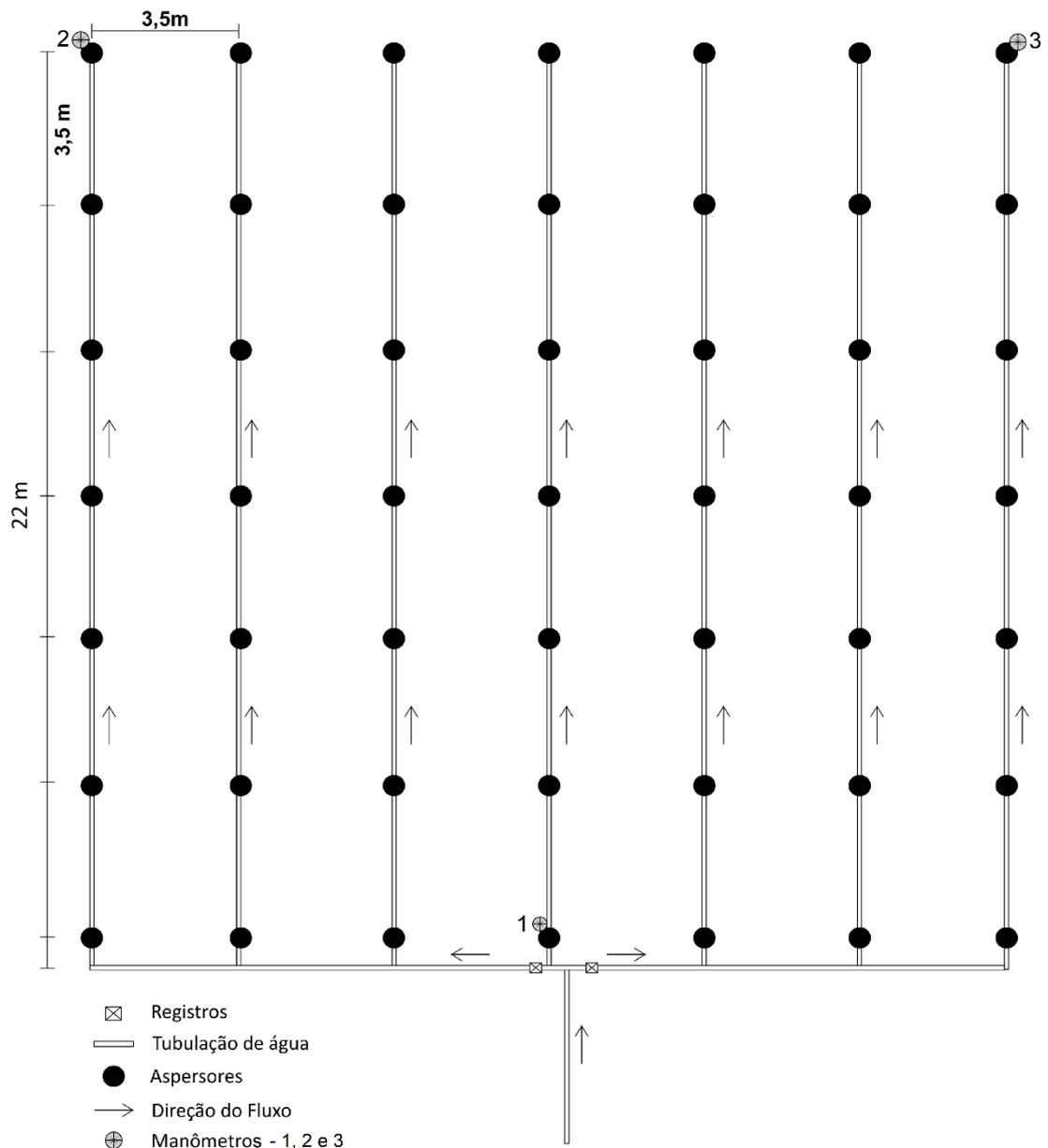
Com o conjunto de dados de conteúdo de água no solo (% de volume) e tempo (horas) para as diferentes camadas, foram elaborados gráficos e determinadas equações de regressões potenciais entre as variáveis. As regressões foram realizadas para normalizar os dados em uma curva, eliminando dessa forma a dispersão dos pontos no gráfico. Com uso dessas equações foi estimado o máximo conteúdo de água no solo também para o tempo de 96 horas.

5.3 SIMULAÇÕES DE CHUVA

O simulador de chuva foi montado em toda a área das parcelas com tubulação de 75 mm de diâmetro na linha principal e na parte inferior (de menor cota), por onde ocorre a entrada d'água no sistema e a sua distribuição para outras 7 linhas laterais também com tubulação de PVC rígido de 75 mm de diâmetro com 22 metros cada. As 7 linhas laterais estão espaçadas entre si por 3,5 metros de distância e estão situadas junto às chapas divisórias das parcelas.

Cada linha lateral possui 7 aspersores espaçados 3,5 m ao longo da linha. As chuvas foram simuladas com uso de aspersores fixo de pivô central. Na figura 7 é representado o simulador. A fonte de água foi um açude localizado a aproximadamente 70 metros das parcelas. Para registrar a pressão de serviço do sistema foram instalados três manômetros, um junto ao aspersor de menor distância da entrada d'água e os outros dois juntos aos aspersores mais afastados da entrada d'água. Dessa forma é possível detectar possíveis perdas de pressão ao longo do sistema. Dois registros foram instalados em cada lado à entrada d'água no sistema (Figura 7). Isso permite ajustar a pressão de serviço.

Figura 7 – Representação do simulador de chuva.



Fonte: Grupo de pesquisa em recursos hídricos e saneamento ambiental – GHIDROS.

Foram realizados testes para verificar a intensidade e distribuição das chuvas produzidas. Os testes foram realizados com diferentes diâmetros de bocal dos aspersores. Foram distribuídos 16 pluviômetros em malha quadrada delimitada por quatro aspersores (3,5 x 3,5 m) (figura 8).

Figura 8 – Teste de precipitação do simulador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi utilizado o coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) para verificar a uniformidade da chuva produzida pelos aspersores (equação 7):

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X|}{n \cdot X}\right) \cdot 100 \quad (7)$$

sendo *CUC* o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%), X_i a precipitação do pluviômetro de ordem i (mm), X a média aritmética das precipitações (mm) e n o número de pluviômetros.

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos testes do simulador. As intensidades de chuva que o simulador opera são de 80 e 97 mm h⁻¹. Desse modo foram realizadas três simulações de chuva em diferentes dias. Na tabela 2 são apresentadas as informações das simulações de chuva realizadas.

Tabela 1 – Características dos aspersores, pressões de operação do sistema, intensidade das precipitações obtidas (p) e valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Diâmetro do bocal (mm)	Pressão nos manômetros (N cm ⁻²)		p (mm h ⁻¹)	CUC (%)
	1	2 e 3		
4,0	25,50	25,50	80	80
5,2	12,75	12,75	97	81

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Características das simulações de chuvas realizadas.

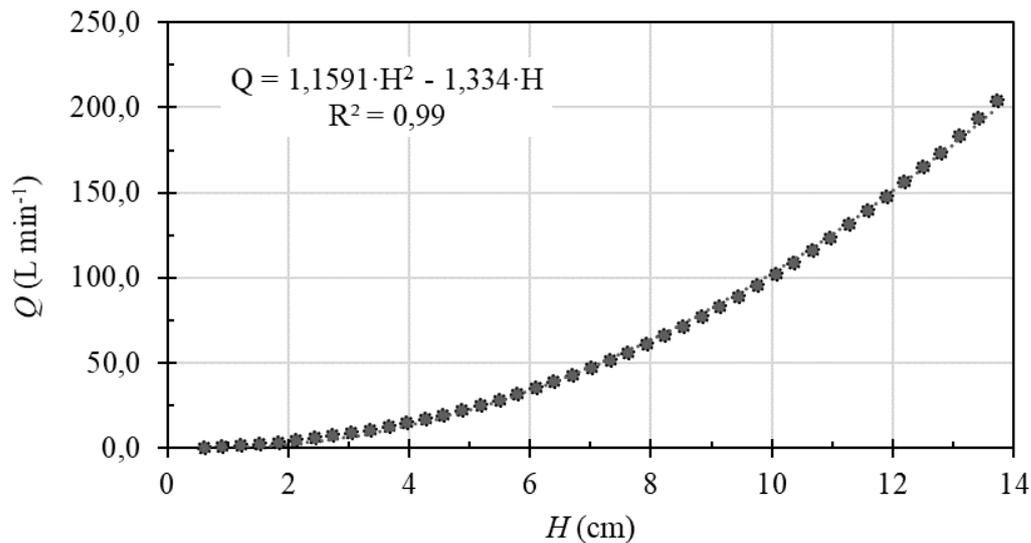
Data	Simulação	Intensidade (mm h ⁻¹)	Duração (minutos)	Chuva total (mm)	Cobertura do solo
27/03/2017	S1	80	120	160	Soja maturação fisiológica – colheita
15/05/2017	S2	80	65	88	Azevém e Aveia preta em estágio vegetativo – 5 cm
19/06/2017	S3	97	65	113	Azevém e Aveia preta em estágio vegetativo – 15 cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 MONITORAMENTO

5.4.1 Escoamento superficial

O escoamento superficial foi determinado em cada parcela por meio de calhas do tipo *HL*. A leitura do nível da lâmina de água a cada 5 minutos foi realizada por sensores ultrassônicos de nível instalados sobre às calhas. As calhas utilizadas denominam-se *HL 0.6 foot deep* e seguem os padrões apresentados por Brakensiek et al. (1979). Para verificar a calibração das calhas foram aplicadas vazões conhecidas com uso de hidrômetros de precisão onde foram relacionados vazão e cota. Na figura 9 são apresentados o gráfico e equação dessa relação.

Figura 9 – Relação entre vazão (Q) e cota (H) para as calhas HL .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Optou-se nesse estudo por analisar os dados de escoamento superficial (es) por metro de largura das parcelas. Assim os dados monitorados do es foram divididos por 3,5 m obtendo a unidade em $L \cdot min^{-1} \cdot m^{-1}$.

5.4.2 Taxa de infiltração de água no solo

Dado de entrada importante para o modelo do escoamento superficial é a taxa de infiltração de água do solo. Para isso foram realizadas simulações de chuva nas parcelas testemunha (sem vertical mulching), com intensidades e durações diferentes. A taxa de infiltração de água no solo com uso do simulador de chuva foi obtida pela diferença entre intensidade da chuva e a taxa de escoamento superficial calculada pela equação 8:

$$i = p - \frac{es_{sem}}{A} \quad (8)$$

sendo i a taxa da infiltração de água no solo ($mm \cdot h^{-1}$), p a intensidade da chuva ($mm \cdot h^{-1}$); es_{sem} a taxa de escoamento superficial em T_{sem} ($L \cdot h^{-1}$), e A a área da parcela (m^2) que é de 77 m^2 .

Para verificar os dados obtidos com o simulador de chuva foram realizados testes adicionais de infiltração com infiltrômetros de duplo anel com três repetições, seguindo metodologia descrita por Bernardo et al. (2008).

5.4.3 Taxa de infiltração no vertical mulching

Outra informação necessária para o modelo do escoamento superficial e análise de espaçamentos entre sulcos é a taxa de infiltração de água no sulco do VM. O dimensionamento da estrutura visa captar o maior volume de água possível. Dessa forma para o cálculo de i_{VM} (taxa de infiltração básica no vertical mulching) foi utilizado a equação 9. Essa equação considera que a diferença entre as taxas de escoamento entre T_{sem} e T_{com} é a taxa de infiltração no vertical mulching:

$$i_{VM} = \frac{e_{STsem} - e_{STcom}}{2 \cdot 3,5} \quad (9)$$

sendo i_{VM} a taxa de infiltração de água no VM por 1 m de sulco ($L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$), e_{STsem} a taxa de escoamento superficial em T_{sem} ($L \text{ min}^{-1}$), e_{STcom} a taxa de escoamento superficial em T_{com} ($L \text{ min}^{-1}$), 2 é o número de sulcos em T_{com} , e 3,5 é o fator para transformar a unidade em metro de sulco, uma vez que os sulcos na área de estudo possuem 3,5 m de comprimento.

5.4.4 Distribuição de água no solo no entorno do sulco

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo e o quanto a água se desloca no solo por meio do vertical mulching foi utilizada a sonda TDR (do inglês *Time Domain Reflectometry*) do tipo móvel, modelo TRIME-PIKO IPH/T3 da empresa IMKO (Ettlingen, Alemanha). A sonda determina o conteúdo de água no solo (% de volume) ao longo do seu comprimento de 18 cm. Por meio de tubos de acrílico cilíndricos instalados verticalmente no solo foi possível realizar a determinação integrada do conteúdo de água no perfil de solo.

O sinal que a sonda emite para realizar a medida possui forma elíptica, assim, para representar adequadamente o conteúdo de água no solo em uma camada é necessário girar a sonda para realizar a leitura em mais de uma posição em uma mesma camada. As

determinações foram realizadas com 6 posições (a cada 30°) em cada profundidade de acordo com o recomendado por Kotulla (2013) e Töpfer (2016).

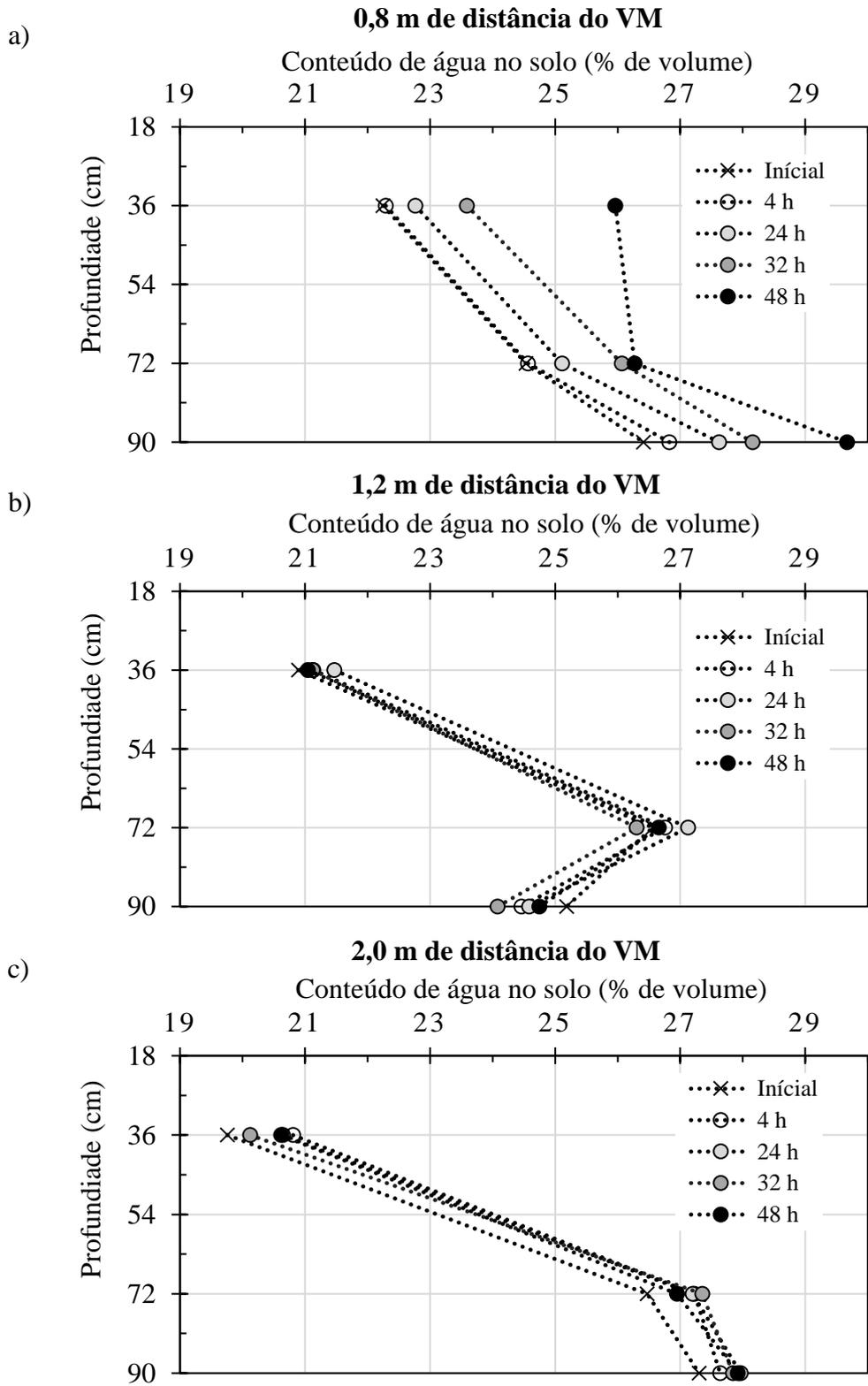
Para determinar a disposição dos tubos próximos aos sulcos em T_{com} foram realizados testes preliminares em área próxima às parcelas para verificar o quão longe a água se desloca horizontalmente no solo. Essa etapa é importante, pois previne a instalação de tubos em áreas de solo que não são abastecidas pela infiltração de água por meio do VM.

Nesse teste foi aberto, em local ao lado do experimento, vertical mulching de 1 metro de comprimento no sentido da curva de nível e com dimensões de largura e profundidade idênticas ao do tratamento T_{com} . Foram instalados tubos de acesso a 0,8; 1,2 e 2,0 metros de distância do sulco no sentido do declive. Foram realizadas determinações nas camadas de 0,18-0,36; 0,54-0,72 e 0,72-0,90 m de profundidade. O sulco do VM foi mantido completo com água e realizadas medições antes da aplicação de água e nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 46, 47 e 48 horas após. Desse modo foi possível verificar a máxima distância de instalação de um tubo do VM. Na figura 10 são apresentados os dados do conteúdo de água no solo em função da profundidade para os tempos inicial e 4, 24, 32, 48 h. Os testes mostraram que após 48 h com o VM cheio de água (condição extrema), houve aumento do conteúdo inicial de água no solo apenas no tubo instalado a 0,8 m de distância e não houve variação representativa nos tubos instalados a 1,2 e 2,0 m.

Com base nessa informação foram instalados em cada uma das parcelas do tratamento T_{com} , 4 tubos de 2 metros de comprimento a 0,2; 0,4; 0,7 e 1,0 m de distância do VM no sentido do declive (Figura 11). Nas parcelas do tratamento T_{sem} foram instalados 4 tubos de 1 metro de comprimento, espaçados a cada 5 metros, para verificar a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo no conjunto experimental. Essas informações foram utilizadas para fornecer dados de entrada do conteúdo inicial de água no solo para a calibração do modelo de Green e Ampt (1911) que está descrito no item 5.5.1.

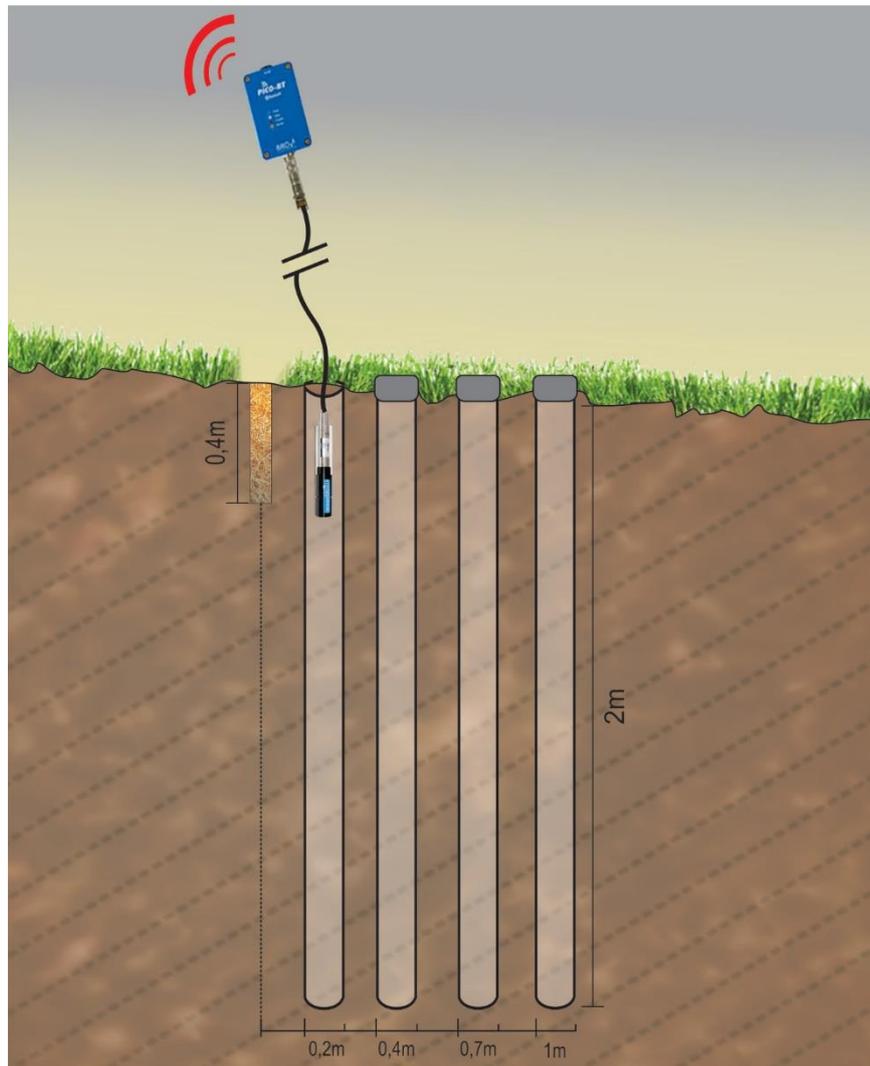
Na figura 7 é possível verificar essa disposição dos tubos nos dois tratamentos. As determinações do conteúdo de água no solo foram realizadas antes e após 4, 24, 32 e 48 horas da realização das simulações de chuva.

Figura 10 – Perfis do conteúdo de água no solo para os tempos inicial, 4, 24, 32 e 48 horas. Tubo instalado: a) a 0,8 m; b) a 1,2 m; c) a 2,0 m de distância do VM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Disposição dos tubos de acesso utilizados nas medições do conteúdo de água no solo em T_{com} .



Fonte: Grupo de pesquisa em recursos hídricos e saneamento ambiental – GHIDROS.

5.5 MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

5.5.1 escoamento superficial

O escoamento superficial e a infiltração de água no solo são processos antagônicos, isto é, à medida que há aumento em um fator há decréscimo no outro. Para obtenção do escoamento superficial foi utilizada a equação 10:

$$es = p - i \quad (10)$$

sendo es a taxa de escoamento superficial (mm h^{-1}), p a intensidade da precipitação (mm h^{-1}), e i a taxa de infiltração de água no solo (mm h^{-1}).

Para utilização da equação 10, i foi derivado da equação de infiltração de Green e Ampt (1911) que foi posteriormente modificada por Mein e Larson (1973), denominada nesse estudo de GA-ML. Essa equação foi desenvolvida com base na equação de Darcy na forma da equação 11:

$$i = K_s \cdot \left(\frac{\tau}{\Delta z} + 1 \right) \quad (11)$$

sendo i a taxa de infiltração (mm h^{-1}), K_s a condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}), τ a tensão matricial na frente de molhamento e Δz a profundidade da frente de molhamento.

Como resultado da infiltração, o conteúdo de água no solo atrás da frente de molhamento é elevado do conteúdo inicial de água no solo (θ_i) até o conteúdo saturado de água no solo (θ_s). Desse modo a infiltração acumulada (I) é obtida pela equação 12:

$$I = (\theta_s - \theta_i) \cdot \Delta z \quad (12)$$

Rearranjando a equação 12, Δz pode ser obtido pela equação 13:

$$\Delta z = \frac{I}{\theta_s - \theta_i} \quad (13)$$

Substituindo a equação 13 em 11 tem-se a equação 14, que é a forma mais simplificada para descrever o modelo de infiltração proposto por GA-ML:

$$i_t = K_s \cdot \left(\frac{\tau \cdot (\theta_s - \theta_i)}{I_t} + 1 \right) \quad (14)$$

A variável tempo (t) foi introduzida na equação 14, porque i e I são dependentes do tempo. Essa equação mostra que a taxa de infiltração em determinado período depende da infiltração acumulada nesse mesmo tempo. Dessa forma para calcular a taxa de infiltração no

tempo $t+\Delta t$ ($i_{t+\Delta t}$) deve-se saber a infiltração acumulada no mesmo tempo ($I_{t+\Delta t}$). No modelo GA-ML isso é calculado como:

$$I_{t+\Delta t} = \sum_{t=0}^t (i_t \cdot \Delta t) \quad (15)$$

A equação 15 implica que a taxa de infiltração no tempo t (i_t) é válida para a duração de tempo Δt (em minutos). Como mencionado anteriormente, i diminui com o tempo. Nota-se que não é possível calcular a taxa de infiltração para o tempo $t = 0$ (i_0) com a equação 14. Para contornar esse problema i_0 foi ajustado para ser igual a intensidade da precipitação ($i_0 = p$).

A equação 14 calcula a taxa potencial de infiltração, que na forma como está apresentada pode exceder a intensidade da precipitação (p). Portanto, foi comparada a taxa de infiltração calculada com p , aplicando a seguinte condição:

$$\text{se } i_t > p \text{ então } i_t = p \quad (16)$$

No modelo normalmente a taxa potencial de infiltração é maior que a intensidade da precipitação nos primeiros instantes de tempo, até o tempo t_e , quando se tornam iguais ($i_{te} = p$). Assim, até esse mesmo momento toda a precipitação irá infiltrar, de modo que:

$$I_{te} = p \cdot t_e \quad (17)$$

sendo I_{te} = infiltração acumulada (mm) até o tempo t_e . Substituindo a equação 17 na equação 14 para $t = t_e$, quando $i_{te} = p$ tem-se:

$$i_{te} = p = K_s \cdot \left(\frac{\tau \cdot (\theta_s - \theta_i)}{p \cdot t_e} + 1 \right) \quad (18)$$

Rearranjando a equação 18, t_e pode ser obtido por:

$$t_e = \frac{\tau \cdot (\theta_s - \theta_i)}{p \cdot \left(\frac{p}{K_s} - 1 \right)} \quad (19)$$

Antes de t_e toda a chuva irá infiltrar de forma que não haja escoamento. Pouco tempo depois há a geração do escoamento e a sua taxa torna-se cada vez maior com o tempo, como descrevem as equações 10 e 14. Outros importantes aspectos sobre a infiltração, que podem ser deduzidos das equações anteriormente mencionadas são:

- i) a taxa de infiltração diminui enquanto a infiltração acumulada aumenta;
- ii) conforme I assume valores elevados o termo da equação $\tau \cdot (\theta_s - \theta_i)/I$ assume valores baixos e a taxa de infiltração básica se aproxima de K_s ;
- iii) quanto menor θ_i , maior é a taxa de infiltração;
- iv) quanto maior θ_s que é igual a porosidade total do solo, maior é a taxa de infiltração;
- v) quanto maior a intensidade da precipitação (p), mais cedo começa o escoamento superficial; e
- vi) se $p \leq K_s$ toda a chuva irá infiltrar e não haverá escoamento superficial.

A descrição matemática da infiltração com a equação 14 é fisicamente correta. Entretanto, o problema com a abordagem do modelo GA-ML é o fato de serem utilizados valores únicos para os parâmetros K_s , τ , θ_i e θ_s , ou seja, aplica-se para condições de solo homogêneo. Na natureza isso quase nunca é o caso. Especialmente o conteúdo inicial de água no solo, que é improvável que seja o mesmo em um perfil inteiro de solo. No entanto, o modelo GA-ML pode funcionar mesmo sob condições não totalmente homogêneas, como será mostrado nos resultados desse estudo.

Com base nas equações mencionadas foi escrito um modelo computacional na linguagem QB64. Esse modelo está apresentado no apêndice A. O modelo foi programado para dar os seguintes resultados: taxa de infiltração, taxa de escoamento superficial, infiltração acumulada, escoamento superficial acumulado, taxa de infiltração no sulco e escoamento superficial após o sulco. Após a calibração do modelo, foram realizadas simulações para θ_i igual a 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. e intensidades de chuva de 40, 60, 80, 100 e 120 mm h⁻¹.

5.5.2 Espaçamento entre sulcos

A análise do espaçamento entre sulcos do vertical mulching objetivou verificar a eficiência da técnica em conter o escoamento superficial gerado por chuvas intensas. Para isso, além do conhecimento do processo de infiltração de água no solo, no sulco e a dinâmica do escoamento sobre diferentes condições de umidade inicial e chuva (metodologias descritas

respectivamente nos itens 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 e 5.5.1), também é importante definir o tempo de retorno (Tr) para o cálculo da chuva máxima esperada.

Em áreas agrícolas no Brasil é amplamente utilizado tempo de retorno de 10 anos para obras de drenagem como por exemplo a construção de terraços. Nesse caso, para o cálculo da chuva máxima esperada é comum adotar chuvas com duração igual ao tempo de concentração da encosta (local onde deseja-se construir terraços) que geralmente é entre 10 e 20 minutos. Já que conceitualmente o espaçamento entre terraços não é tão diferente do espaçamento desejado entre sulcos foram consideradas nessa análise as chuvas máximas para as durações de 20 minutos. Adicionalmente também foram analisadas as chuvas com durações de 60 e 120 minutos.

O tempo de retorno adotado foi o de 20 anos, pois não há grande diferença nas intensidades das precipitações geradas com relação ao Tr de 10 anos (quadro 1) e pelo motivo de que em obras de drenagem é sempre preferível adotar critérios mais cautelosos. Essas informações foram extraídas das curvas i-d-f (intensidade, duração e frequência) deduzidas por Ramon (2015) para a cidade de Santa Maria.

Quadro 1 – Intensidades máximas de chuva (mm h^{-1}) obtidas pela equação i-d-f deduzida por Ramon (2015) para tempo de retorno (Tr) de 10 e 20 anos e durações de chuva de 20, 60 e 120 minutos para a cidade de Santa Maria - RS.

Tr (anos)	Duração (minutos)		
	20	60	120
10	111,00	58,79	37,29
20	124,00	65,83	41,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar a eficiência de diferentes espaçamentos entre sulcos em deter o escoamento superficial o modelo de GA-ML desenvolvido e descrito anteriormente foi modificado para também responder a essa pergunta. O modelo foi programado para calcular o escoamento superficial após o vertical mulching. A descrição do modelo GA-ML assim como essa modificação para o cálculo do escoamento considerando a existência de sulcos do vertical mulching está apresentada no apêndice A.

Para isso foi utilizado o cálculo do escoamento superficial gerado pelo modelo e a taxa de infiltração no sulco do vertical mulching. Dessa forma o escoamento superficial em uma área com o vertical mulching pode ser calculado pela equação 20:

$$es_r = (x \cdot es_{calc}) - i_{VM} \quad (20)$$

sendo es_r a taxa de escoamento superficial residual após o sulco ($L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$ de sulco), x o espaçamento entre sulcos do vertical mulching (m), es_{calc} a taxa de escoamento superficial calculada pelo modelo ($\text{mm min}^{-1} = L \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$) com uso dos parâmetros K_s e τ calibrados a partir dos dados observados, e i_{VM} a taxa de infiltração no vertical mulching ($L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$). É suficiente realizar os cálculos para 1 m de largura do campo, porque cada 1 m de sulco precisa deter o mesmo volume de água.

Para verificar se os dados obtidos pela equação 20 são confiáveis foi realizada a verificação junto aos dados observados. O critério de análise dessa verificação está apresentado no item 5.7. O cálculo de es_r foi realizado para os espaçamentos entre sulcos de 5, 10, 15, 20 e 25 m e diferentes condições de conteúdo inicial de água no solo sendo elas 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. Com uso desses dados de entrada e da equação 20 acrescentada no modelo descrito no item 5.5.1 foi possível verificar a eficiência da técnica em conter o escoamento gerado por chuvas intensas para o local do estudo.

5.6 MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Para calcular a distribuição de água no solo por meio do sulco do VM foi utilizado o modelo de infiltração bidimensional denominado Infil2D. O modelo foi desenvolvido para fins de ensino na Naturwissenschaftliche Fakultät III (Faculdade de Ciências Naturais III) da Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg em Halle, Alemanha.

Trata-se de um modelo explícito de diferenças finitas que utiliza a iteração de Jacobi para calcular um novo valor de conteúdo de água no solo e, conseqüentemente, um novo valor de potencial de água e condutividade hidráulica para cada “nó” (ponto do solo considerado) após determinado intervalo de tempo. Por ser um modelo explícito o intervalo de tempo deve ser curto para garantir uma solução estável. A vantagem desse modelo é que a abordagem explícita é mais fácil de ser entendida e utilizada que outros possíveis algoritmos. Isso é útil para usuários que não são familiarizados com métodos numéricos e programação, mas que desejam entender o que está acontecendo no modelo.

As principais entradas do modelo são:

- Número de linhas e colunas (as interseções das linhas e colunas definem os “nós”);
- Área representada por cada “nó”;

- Distância entre os nós;
- Duração da infiltração;
- Duração do processamento (corrida do modelo);
- Passo de tempo (intervalo de tempo que os resultados serão gerados);
- Curva de retenção de água no solo para cada “nó”;
- Condutividade hidráulica saturada para cada “nó”;
- Conteúdo inicial de água no solo para cada “nó”.

Os resultados são gerados na forma de matriz que apresenta o conteúdo de água no solo para cada “nó” após o passo de tempo selecionado pelo usuário (geralmente de 10 a 60 minutos). O algoritmo utilizado e a descrição detalhada do modelo são apresentados no anexo A.

Com o modelo Infil2D objetivou-se avaliar o processo de infiltração em sulcos do vertical mulching. Esse estudo foi aplicado reproduzindo as condições monitoradas, assim realizando a calibração do modelo, e posteriormente considerando dados de textura extraídos de Campbell (1985) para solos do tipo franco arenoso, franco argiloso e argiloso. Essas texturas dos solos foram definidas por serem as mais representativas das áreas de cultivo agrícola para o estado do Rio Grande do Sul.

É evidente que os resultados gerados não representam fielmente as condições a campo, porque com essa análise está se assumindo que os solos são homogêneos e conforme discutido anteriormente os solos dificilmente o são. Entretanto, é necessário realizar essa análise pois é importante conhecer o processo de infiltração em sulcos do VM para diferentes tipos de solo.

Para esse estudo duas abordagens foram utilizadas:

- i) a infiltração ocorre apenas em sulcos do vertical mulching; e
- ii) a infiltração ocorre na superfície do solo e no sulco do vertical mulching (condição natural).

Dessa forma é possível caracterizar a frente de molhamento gerada pela infiltração no sulco.

5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística nesse estudo consistiu na avaliação do desempenho dos modelos em representar os dados observados. Para isso foram utilizados o percentual de viés (*PBIAS*),

índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*), análise de diagramas de dispersão e análise do coeficiente de correlação linear de Pearson.

O índice *PBIAS* indica a tendência média dos dados simulados em serem maiores ou menores que os dados observados (Moriasi et al., 2007) e é descrito na forma da equação 21:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \right] \cdot 100 \quad (21)$$

sendo *PBIAS* o desvio dos dados que estão sendo avaliados em porcentagem, Y_i^{obs} a *i*-ésima observação da variável sendo observada e Y_i^{sim} o *i*-ésimo valor simulado da variável que está sendo simulada. Segundo Moriasi et al. (2007) o valor ótimo para esse índice é zero. Valores positivos ou negativos indicam que o modelo respectivamente superestima ou subestima os dados observados.

O índice *NSE* determina a magnitude relativa da variância residual comparada a variância dos dados medidos (Moriasi et al., (2007) e é expresso na forma da equação 22:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{média})^2} \right] \quad (22)$$

sendo $Y^{média}$ a média da variável observada.

Segundo Moriasi et al., (2007) os valores de *NSE* podem situar-se entre e $-\infty$ e 1, sendo $NSE = 1$ o valor ótimo. Os autores definiram a classificação de desempenho desses dois índices para modelos hidrológicos apresentada aqui na tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do desempenho de modelos hidrológicos pelos índices *NSE* e *PBIAS*.

Desempenho	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> (%)
Muito bom	> 0.75 – 1.00	< ±10
Bom	> 0.65 – 0.75	±10 – < ±15
Satisfatório	> 0.50 – 0.65	±15 – < ±25
Insatisfatório	≤ 0.50	≥ ±25

Fonte: Moriasi et al., (2007).

Outra análise realizada para avaliar os ajustes dos modelos foi por meio da análise dos diagramas de dispersão e determinação do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre os dados observados a campo e calculados pelo modelo. Segundo Naghettini e Pinto (2007) um diagrama de dispersão consiste em um gráfico onde são plotados em coordenadas cartesianas os pares de observações simultâneas das variáveis. Segundo os autores duas variáveis apresentam uma correlação linear quando os pontos do diagrama de dispersão se aproximam de uma reta.

O coeficiente linear de Pearson é expresso pela equação 23

$$r = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (23)$$

sendo $\sigma_{x,y}$ a covariância entre as variáveis x e y , e σ_x e σ_y os desvios-padrão das variáveis x e y , respectivamente.

Valores de r podem variar entre -1 a +1. Valor igual a 0 indica que não há associação entre as variáveis. Valor maior que 0 indica associação positiva e valor menor que 0 indica associação negativa entre as variáveis. Dessa forma quanto mais forte a associação entre as variáveis mais próximas de -1 ou +1 o coeficiente de Pearson estará. Para esse estudo se espera uma correlação positiva entre os dados calibrados e observados, dessa forma quanto mais próximo a +1 for o valor de r , melhor será o desempenho dos modelos segundo o coeficiente de Pearson.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

6.1.1 Densidade, porosidade e textura do solo

Na tabela 4 são apresentados os dados de porosidade (total, macroporosidade e microporosidade), densidade do solo e textura do solo.

Tabela 4 – Propriedades físicas do solo.

Camadas	m	Porosidade			DS	Textura				
		Total	Macro	Micro		At	Ag	Af	S	A
		-----% de volume-----			g cm ⁻³	-----% de massa-----				
1	0,00-0,18	40,08	16,89	23,19	1,58	74,67	44,19	30,48	14,24	11,09
2	0,18-0,36	32,04	4,23	27,81	1,74	67,93	39,38	28,55	16,67	15,40
3	0,36-0,54	29,61	1,80	27,81	1,85	66,42	36,63	29,79	18,06	15,52
4	0,54-0,72	29,57	3,91	25,66	1,85	66,30	36,20	30,10	20,97	12,73
5	0,72-0,90	36,98	3,99	32,99	1,65	61,57	32,36	29,21	20,64	17,78
6	0,90-1,08	39,24	1,77	37,47	1,50	39,09	20,24	18,85	14,94	45,97
7	1,08-1,26	39,24	1,77	37,47	1,59	39,75	22,00	17,75	13,75	46,50
8	1,26-1,44	39,80	3,25	36,55	1,57	41,96	22,82	19,14	13,83	44,21
9	1,44-1,62	43,03	6,69	36,34	1,48	42,96	24,45	18,51	12,84	44,20
10	1,62-1,80	42,08	4,48	37,60	1,56	43,47	25,44	18,03	15,51	41,02
11	1,80-1,98	44,05	7,87	36,18	1,49	47,47	27,75	19,72	15,78	36,75

Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; DS = densidade do solo; At = areia total; Ag = areia grossa; Af = areia fina; S = silte; A = argila.

Fonte: Elaborado pelo autor.

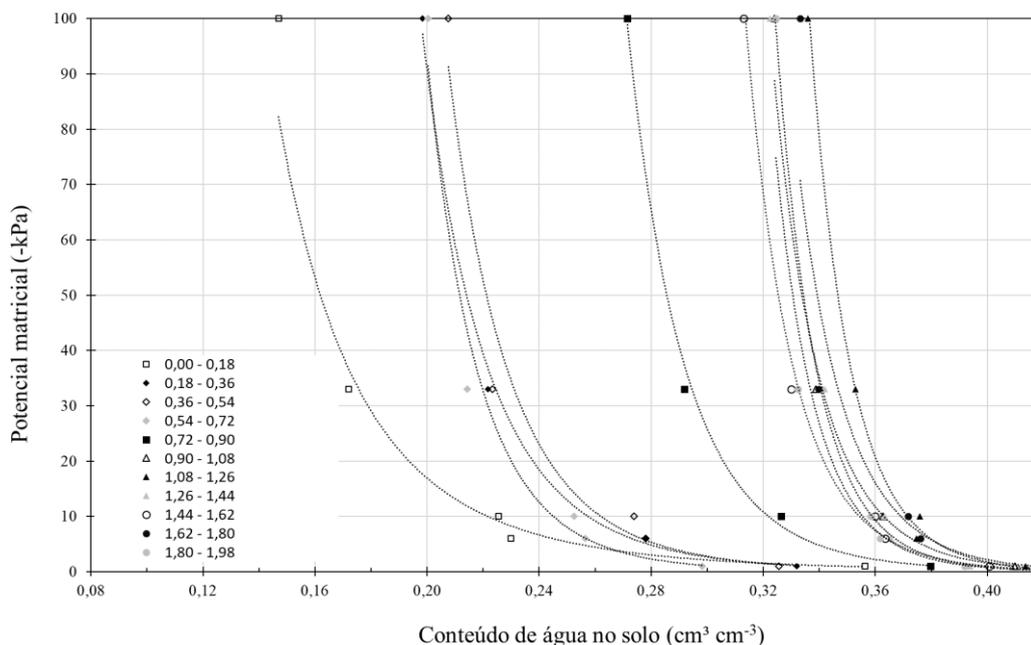
A textura do solo é um dos fatores determinantes para a infiltração de água no solo. Maiores percentagens de areia em relação a percentagens de argila geralmente indicam maior permeabilidade no solo. Solos com maior quantidade de argila tendem também a sofrer mais com a compactação. As camadas do solo de 1 a 5 apresentam valores de areia total superiores a 61%. Dessa forma pode-se considerar que a textura para a parte superficial do solo é franco arenoso caracterizado pela alta capacidade de infiltração de água.

A densidade do solo variou de 1,48 g cm⁻³ encontrado nas camadas de maior profundidade, a valores de 1,85 g cm⁻³ mais próximos a superfície. As camadas de 2 a 5 possuem maior densidade que a camada 1. Isso resulta em maior condutividade hidráulica não saturada e saturada do solo na camada 1 em comparação as camadas 2 a 5.

6.1.2 Curvas de retenção de água no solo

Com os dados de tensão para 1, 6, 10, 33 e 100 kPa e os respectivos valores de conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) foram elaborados gráficos e regressões potenciais para determinação das equações. Na figura 12 são apresentadas as curvas de retenção de água no solo para as onze camadas amostradas. Observa-se que na verdade existem quatro camadas de solo distintas bem definidas. Sendo a primeira camada de 0,00 – 0,18 m a segunda de 0,18 – 0,72 m a terceira de 0,72 – 0,90 m e a quarta camada de 0,90 – 1,98 m. Desse modo optou-se por reduzir o número de SWRC de onze para quatro por dois motivos: i) as curvas entre a segunda e quarta, e entre a sexta e a décima primeira camada são semelhantes e não agregariam qualidade de informação; e ii) utilizar quatro ao invés de onze equações e curvas torna mais prático o processo de modelagem da infiltração e distribuição de água no solo.

Figura 12 – Curvas de retenção de água no solo para as onze camadas de amostragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A camada 1 se diferencia das demais por ser a camada mais superficial, com maior teor de matéria orgânica e maior porosidade. A camada 2 apresenta valores percentuais menores de porosidade e possui maior densidade. A camada 3 pode ser considerada zona de transição entre a camada arenosa para a camada argilosa (camada 4).

Na tabela 5a são apresentados os coeficientes a e b da equação 6a para cada uma das quatro camadas. O coeficiente b é responsável pela inclinação da curva, ou seja, quanto maior o valor de b maior é a sua inclinação. Já o coeficiente a é responsável pela posição da curva no eixo y .

A determinação da SWRC para cada camada é importante devido a característica dos solos serem heterogêneos. Utilizar uma equação para todo o perfil do solo pode levar o modelo a erros maiores na calibração, uma vez como mostrado na tabela 4 as características físicas do solo variam consideravelmente de uma camada para outra. Na figura 13 são apresentadas as quatro curvas com as respectivas equações.

Comparando os valores obtidos com os da literatura, em especial aos calculados segundo equação e parâmetros obtidos em Campbell (1985) e apresentados na Tabela 5b, verifica-se que os valores de a e de b são consideravelmente diferentes, principalmente os de a . Essa etapa merece atenção especial, pois a adoção de valores equivocados pode ocasionar em erros no processo de modelagem. Por isso foi realizada análise de consistência dos dados gerados pela SWRC.

Tabela 5a – Coeficientes a e b das equações da curva de retenção de água no solo para cada camada e umidade de saturação do solo (θ_s) determinados com os dados obtidos em laboratório e tensão matricial crítica (ψ_e) calculada pela equação 6c.

	Camada (m)	a (kPa)	b	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	ψ_e (kPa)
1	0,00 - 0,18	0,004419	-5,13	0,401	0,480
2	0,18 - 0,72	0,00003438	-9,74	0,304	1,258
3	0,72 - 0,90	0,000002360	-13,46	0,370	0,278
4	0,90 - 1,98	0,00000001873	-20,92	0,412	0,539

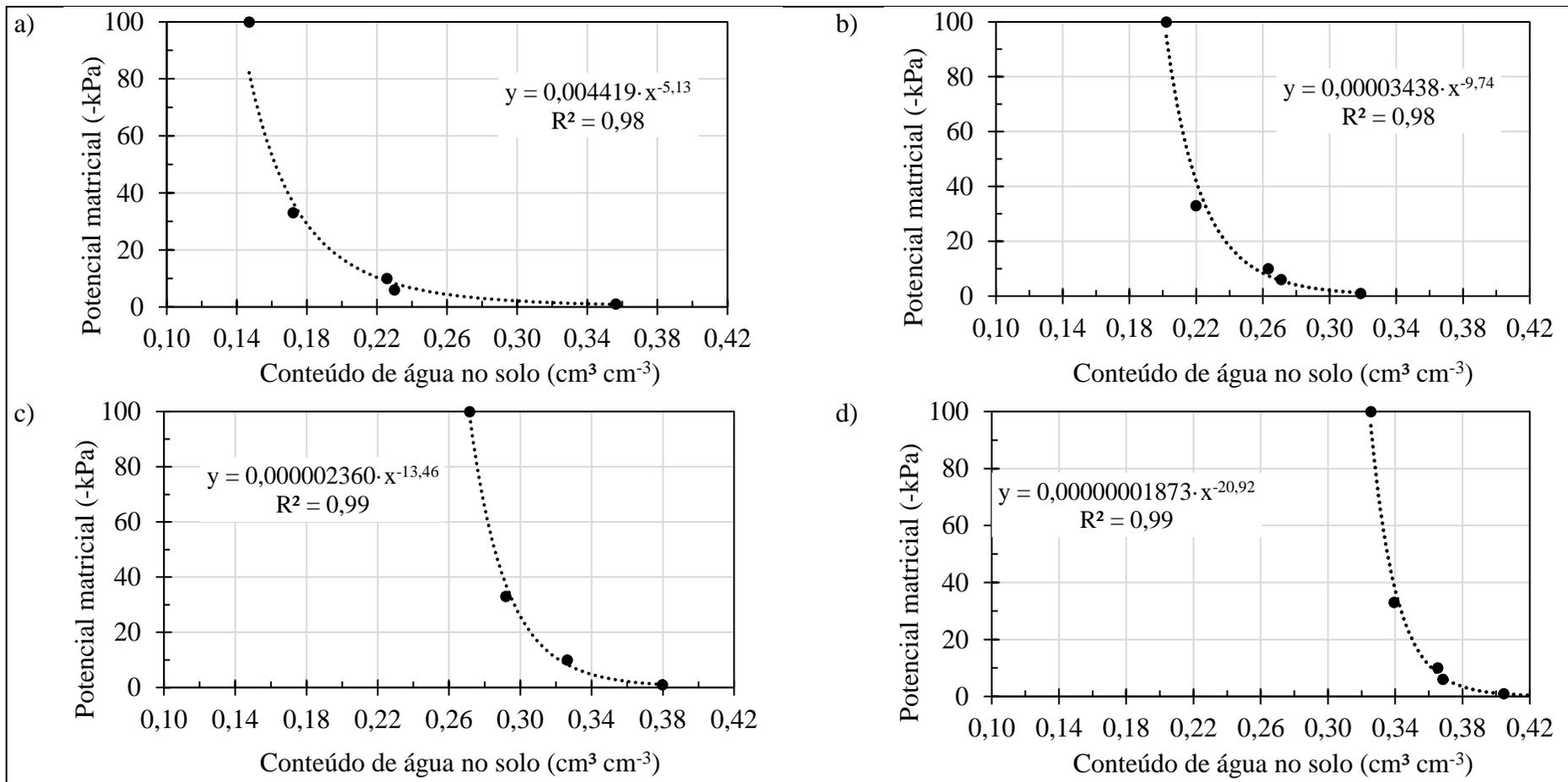
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5b – Coeficientes a e b , e umidade de saturação do solo (θ_s) calculados segundo Campbell (1985) e tensão matricial crítica (ψ_e) calculada pela equação 6c.

	Camada (m)	a (kPa)	b	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	ψ_e (kPa)
1	0,00 - 0,18	0,04428	-3,92	0,404	1,539
2	0,18 - 0,72	0,01313	-4,80	0,317	3,252
3	0,72 - 0,90	0,01410	-5,56	0,377	3,185
4	0,90 - 1,98	0,00098	-10,59	0,422	9,103

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo e equações para as quatro camadas definidas. a) camada de 0,00 - 0,18 m; b) camada de 0,18 - 0,72 m; c) camada de 0,72 - 0,90 m; d) camada de 0,90 - 1,98 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de consistência dos parâmetros obtidos pela SWRC baseou-se na transformação dos dados determinados do conteúdo de água no solo (% de volume) em tensão matricial (kPa) pela aplicação da equação 6a com os parâmetros da tabela 5a. Conforme mencionado anteriormente os dados da SWRC são sensíveis ao parâmetro *b*. Isso pode ser observado quando existem valores muito elevados de tensão matricial, quando comparados com outros valores da mesma região do solo, que possuem valores de conteúdo de água no solo semelhantes. Isso pode ser resultado de alguns problemas como: i) adoção de parâmetros (*a* e *b*) incoerentes com o tipo de solo, ii) simplificação na qual uma camada inteira de solo pode ser representada pelos mesmos parâmetros *a* e *b*, e iii) erros laboratoriais na determinação dos parâmetros da SWRC.

No quadro 2a são apresentados os dados médios do conteúdo inicial de água no solo (% de volume) para o primeiro experimento realizado a campo (S1) e sua transformação para tensão matricial com uso da equação 6a e parâmetros da tabela 5a. No quadro 2b são apresentados os mesmos resultados, só que com a tensão matricial calculada com os parâmetros obtidos e calculados segundo Campbell (1985) (tabela 5b). Os dados convertidos para tensão matricial para os tempos iniciais nas três medições são apresentados no apêndice B.

Quadro 2a – Conteúdo de água no solo e tensão matricial calculada com os parâmetros *a* e *b* da tabela 5a obtidos pelo ajuste da SWRC para os dados médios e tempo inicial em S1.

Camada (m)		S1				S1			
		Conteúdo de água no solo (% de vol.)				Tensão matricial (kPa)			
		0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m
0,00 – 0,18	1	18,51	19,01	18,40	18,51	25,31	22,10	26,13	25,36
0,18 – 0,36	2	21,42	22,54	22,18	19,56	113,27	69,05	80,54	273,94
0,36 – 0,54	3	23,45	23,85	21,45	22,77	46,89	39,72	111,65	62,46
0,36 – 0,72	4	24,55	24,87	21,96	25,24	30,03	26,42	89,08	22,89
0,72 – 0,90	5	27,48	30,13	24,89	30,86	84,10	24,35	318,57	17,64
0,90 – 1,08	6	32,12	33,83	33,23	37,91	389,33	131,82	191,18	12,15
1,08 – 1,26	7	36,22	37,92	37,18	39,68	31,51	12,08	18,27	4,68
1,26 – 1,44	8	35,83	38,06	39,52	40,73	39,52	11,19	5,10	2,71
1,44 – 1,62	9	35,74	33,91	38,16	39,93	41,66	125,34	10,59	4,11
1,62 – 1,80	10	34,85	35,89	36,56	36,08	70,67	38,27	26,01	34,29
1,80 – 1,98	11	33,99	33,91	36,14	35,00	119,68	125,60	33,12	64,66

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 2b – Conteúdo de água no solo e tensão matricial calculada com os parâmetros *a* e *b* da tabela 5b obtidos em Campbell (1985) para os dados médios e tempo inicial em S1.

Camada (m)		S1				S1			
		Conteúdo de água no solo (% de vol)				Tensão matricial (kPa)			
		0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m
0,00 – 0,18	1	18,51	19,01	18,40	18,51	32,67	29,45	33,48	32,72
0,18 – 0,36	2	21,42	22,54	22,18	19,56	21,04	16,49	17,79	32,47
0,36 – 0,54	3	23,45	23,85	21,45	22,77	13,63	12,57	20,89	15,70
0,36 – 0,72	4	24,55	24,87	21,96	25,24	10,95	10,28	18,69	9,58
0,72 – 0,90	5	27,48	30,13	24,89	30,86	18,47	11,07	32,01	9,69
0,90 – 1,08	6	32,12	33,83	33,23	37,91	163,77	94,66	114,25	28,31
1,08 – 1,26	7	36,22	37,92	37,18	39,68	45,87	28,24	34,81	17,47
1,26 – 1,44	8	35,83	38,06	39,52	40,73	51,44	27,16	18,25	13,25
1,44 – 1,62	9	35,74	33,91	38,16	39,93	52,83	92,27	26,41	16,36
1,62 – 1,80	10	34,85	35,89	36,56	36,08	69,04	50,61	41,62	47,87
1,80 – 1,98	11	33,99	33,91	36,14	35,00	90,14	92,36	47,04	66,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores realçados em amarelo são aqueles considerados fora da normalidade (analisando a tensão matricial calculada) quando comparados com os valores próximos no quadro 2a. No quadro 2b foi mantido esse realce para melhor comparação. No quadro 2a verifica-se que na camada 2 a diferença na umidade é de apenas 2,98%, já a diferença da tensão matricial para a mesma camada entre o menor e maior valor encontrados é de 204,89 kPa. Na camada 6 também acontece o mesmo fenômeno. A diferença no conteúdo de água é pequena já a amplitude dos valores de tensão matricial calculados é grande.

Nesse caso elevados valores de tensão matricial também podem ser resultado de medições erradas do conteúdo de água no solo. Entretanto como mostram Kotulla (2013) e Töpfer (2016) a metodologia adotada para determinação do conteúdo de água no solo é segura para a aquisição de dados confiáveis, uma vez que são realizadas medições em seis posições em cada camada.

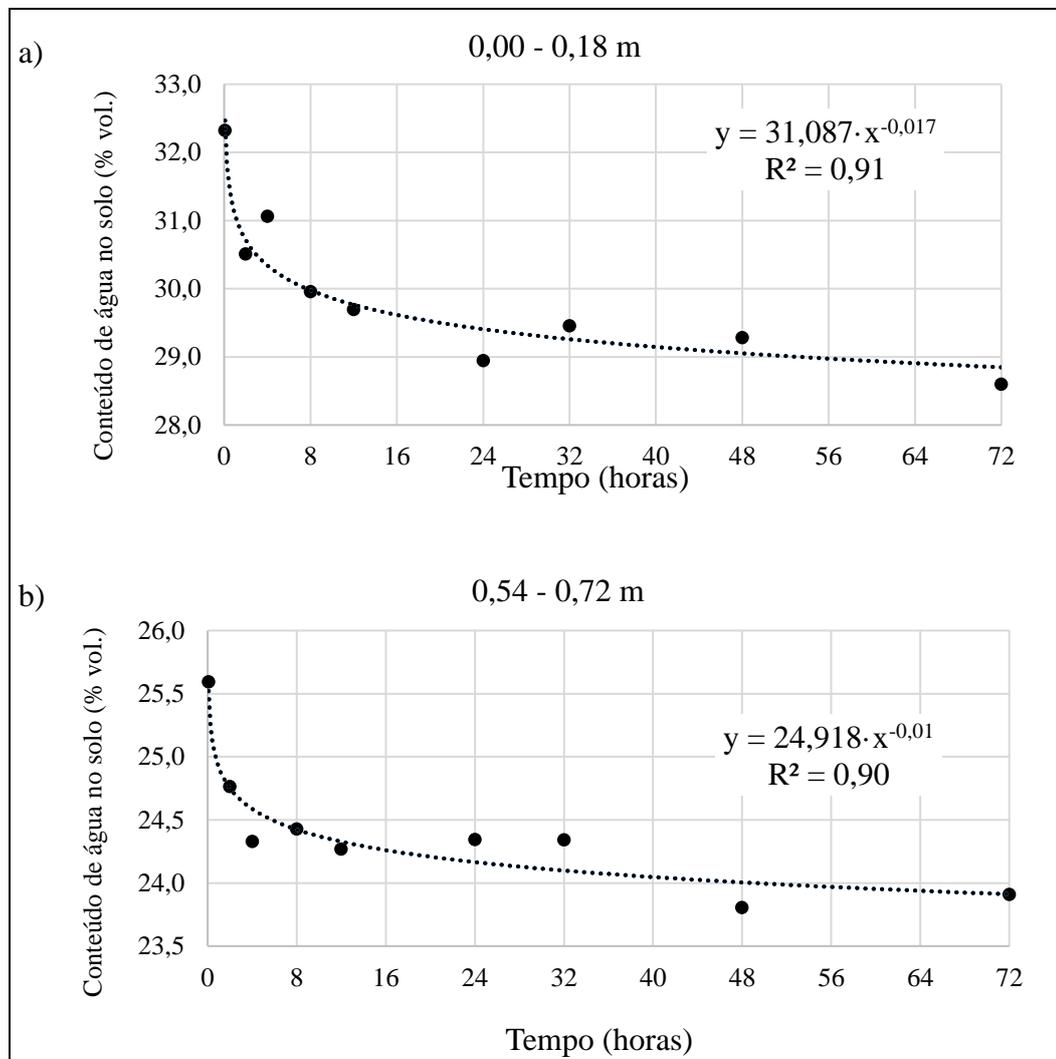
É possível verificar com essa análise de consistência que os dados obtidos para cada camada da SWRC (tabela 5a) não são capazes de representar os dados medidos. Isso porque provavelmente os valores absolutos de “a” encontrados são baixos e principalmente porque os valores absolutos de “b” são elevados demais. Esses valores obtidos em laboratório para cada camada do solo são diferentes dos dados calculados segundo Campbell (1985) para solos de

texturas semelhantes. Dessa forma é necessário realizar a calibração desses parâmetros no modelo de distribuição de água no solo o que será apresentado e discutido na seção 6.4.1.

6.1.3 Teste de drenagem

Na figura 14 são apresentados os gráficos e regressões obtidos pelo teste de drenagem para as camadas 0,00 - 0,18 e 0,54 - 0,72 m. Os demais gráficos possuem a mesma forma dos da figura 14 e são apresentados no apêndice C.

Figura 14 – Regressões e equações da relação conteúdo de água no solo e tempo. a) camada de 0,00 - 0,18 m; b) camada de 0,54 - 0,72 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 6 são apresentados os dados do conteúdo de água no solo para os tempos de 5 minutos, 2, 4, 8, 12, 24, 32, 48, 72 e 96 horas. Observa-se que existe diminuição da taxa de decréscimo do conteúdo de água no solo, porém os valores não são constantes. Reichardt (1988) e Hillel (1998) que trabalharam em solos de características semelhantes também não verificaram o equilíbrio de água no solo após 96 h. Após 12 horas houve variação de apenas 2,6% na camada de 0,00 - 0,18 m, para as demais camadas a taxa de variação foi praticamente a mesma. Após 96 horas o conteúdo de água no solo diminuiu em apenas 3,6% para a camada superficial. Embora o equilíbrio exato de água no solo que determina o conceito de capacidade de campo seja de difícil precisão na condição de ausência de lençol freático próximo a superfície do solo, para esse estudo é importante saber o máximo de água retido no solo em função do tempo após a sua saturação.

Tabela 6 – Valores do conteúdo de água no solo em função do tempo para as 5 camadas estimada pelas equações de regressão.

Tempo (horas)	Conteúdo de água no solo (% de volume)				
	0,00 - 0,18 m	0,18 - 0,36 m	0,36 - 0,54 m	0,54 - 0,72 m	0,72 - 0,90 m
0,083	32,4	27,3	25,3	25,5	25,4
2	30,7	26,1	24,3	24,7	24,7
4	30,4	25,9	24,1	24,6	24,6
8	30,0	25,6	23,8	24,4	24,4
12	29,8	25,5	23,7	24,3	24,4
24	29,5	25,2	23,5	24,1	24,2
32	29,3	25,1	23,4	24,1	24,2
48	29,1	25,0	23,3	24,0	24,1
72	28,9	24,9	23,2	23,9	24,0
96	28,8	24,8	23,1	23,8	24,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse teste serviu como base na definição dos valores de conteúdo inicial de água no solo que foram utilizados nas simulações realizadas com o modelo GA-ML. Foram utilizados valores de conteúdo inicial de água no solo de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. O conteúdo de 32%-vol. foi definido porque após o solo ser saturado por 24 horas em local sem cobertura vegetal o conteúdo máximo de água na superfície não foi maior que 32,4%-vol. Os valores de 28 e 24%-vol porque foram encontrados valores próximos a esses após 96 horas. Ou seja, esses são o máximo conteúdo de água que se pode encontrar no solo após saturação e sem cobertura vegetal após 96 horas. E os valores de 16 e 20%-vol foram assumidos pelo fato de a área do

experimento possuir rotação entre as culturas de soja e azevém/aveia, dessa forma são esperados valores de conteúdo volumétrico de água abaixo de 24%-vol.

6.2 MONITORAMENTO

6.2.1 Escoamento superficial

Nas figuras 15, 16 e 17 são apresentados os hidrogramas para as simulações de chuva S1, S2 e S3 respectivamente para os dois tratamentos estudados. Em S1 o *es* em T_{com} começou aproximadamente 25 minutos após o início do *es* em T_{sem} para as três repetições. Em S2 T_{com} retardou o início do *es* em 10, 5 e 5 minutos para R1, R2, R3 respectivamente em relação a T_{sem} . Em S3 o vertical mulching retardou o *es* em 5 minutos para as três repetições em relação a T_{sem} . Conforme a intensidade da chuva supera a taxa de infiltração de água no solo e o solo atinge seu ponto de saturação, todo o excedente da chuva se acumula sobre a superfície do solo. Em terrenos com declividade essa situação gera escoamento superficial.

O vertical mulching aumenta a área de infiltração na camada de 0,00 - 0,40 m (profundidade do sulco) o que aumenta também o volume de água que atravessa o perfil do solo. Também deve-se considerar o aumento da carga hidráulica que atua como potencial de pressão sobre a área total do sulco, contribuindo para maior infiltração.

Figura 15 – Taxa de escoamento superficial (*es*) em função do tempo para S1 com intensidade de precipitação de 80 mm h^{-1} durante 120 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada.

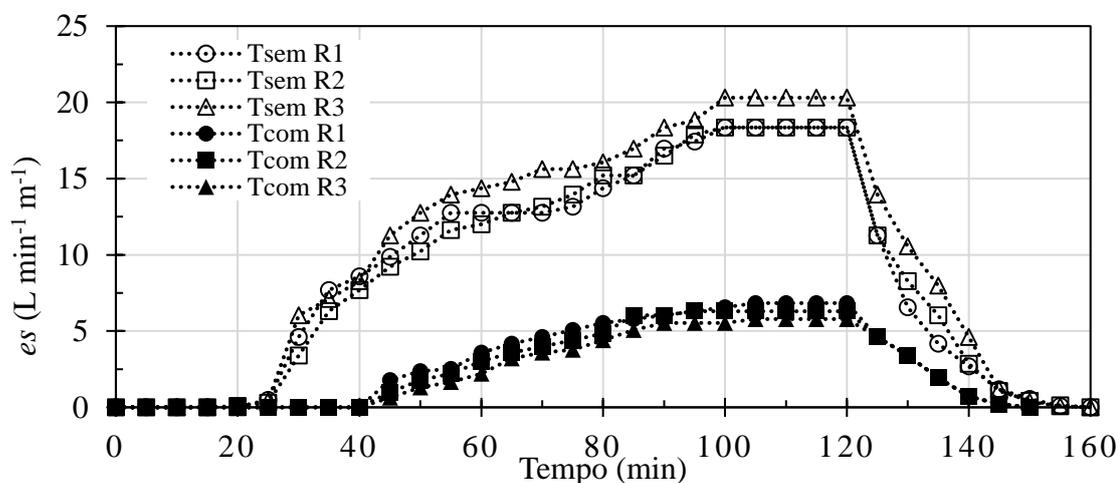
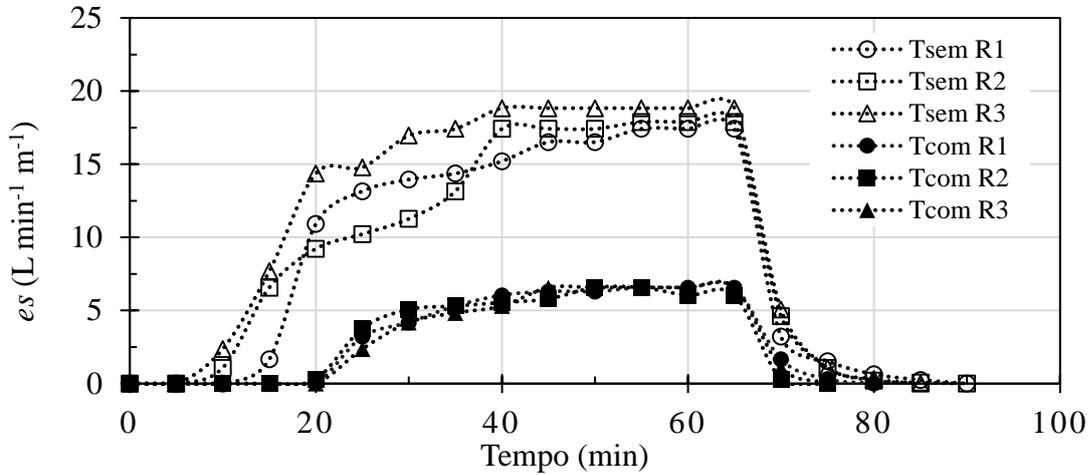
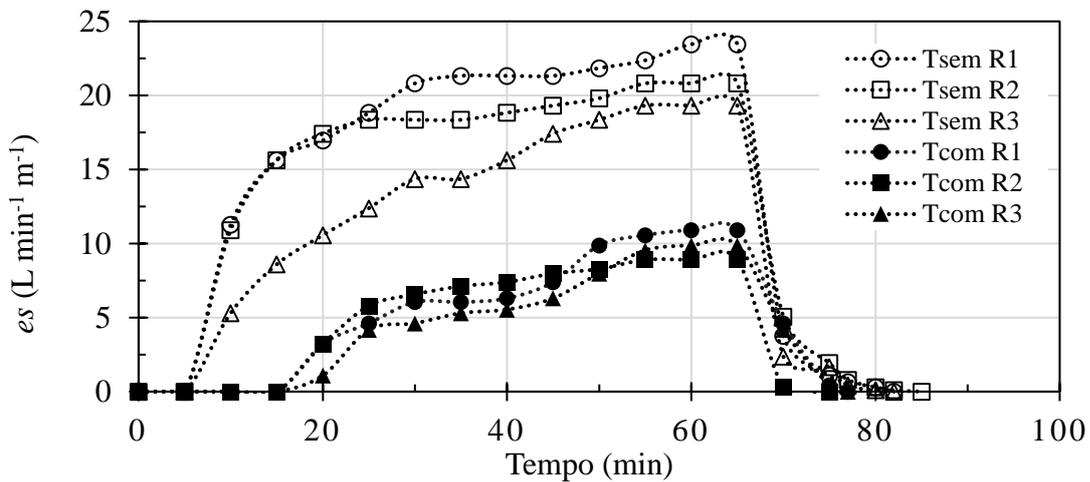


Figura 16 – Taxa de escoamento superficial (es) em função do tempo para S2 com intensidade de precipitação de 80 mm h^{-1} durante 65 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Taxa de escoamento superficial (es) em função do tempo para S3 com intensidade de precipitação de 97 mm h^{-1} durante 65 minutos para T_{com} e T_{sem} em 3 repetições cada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 7 são apresentados os valores correspondentes ao conteúdo inicial médio de água no solo na camada de $0,00 - 0,54 \text{ m}$ (θ_i) (que é a camada de solo mais afetada pela chuva simulada nas primeiras horas e, portanto, o volume de solo que mais afeta a infiltração),

coeficientes de escoamento superficial (C), volume total escoado (m^3) e vazão máxima ($Q_{máx}$, $L s^{-1}$) para as simulações realizadas. Com relação ao volume total escoado a perda de água em T_{sem} foi maior que T_{com} em 65, 47 e 53% para S1, S2 e S3 respectivamente. Com relação a vazão máxima T_{sem} apresentou vazões quase três vezes maiores que T_{com} . Os resultados da tabela 7 mostram que as perdas de água em T_{sem} são maiores que em T_{com} .

A diferença de C entre S1 e S2 é devido ao conteúdo inicial de água no solo menor em S1. S2 e S3 possuem θ_i semelhantes, a diferença em C nesse caso se dá pela maior intensidade da chuva durante a simulação em S3. A maior intensidade da chuva também resultou em valores mais altos de $Q_{máx}$ em S3.

Analisando os valores de vazão máxima que tem forte relação com a capacidade do escoamento em erodir, também são encontradas diferenças entre os tratamentos. No tratamento com o vertical mulching além da redução das perdas de água, a propagação do escoamento atinge uma velocidade máxima mais baixa, diminuindo o potencial de desagregar e transportar as partículas do solo.

Tabela 7 – Conteúdo inicial de água no solo (θ_i), coeficiente do escoamento superficial (C), volume total escoado e vazão máxima do escoamento superficial ($Q_{máx}$) para as simulações realizadas em T_{com} e T_{sem} .

	p mm h ⁻¹	t min	θ_i (0,00 - 0,54 m) %-vol.		C		Vol. escoado m ³		$Q_{máx}$ L min ⁻¹	
			T_{com}	T_{sem}	T_{com}	T_{sem}	T_{com}	T_{sem}	T_{com}	T_{sem}
S1	80	120	20,97	20,77	0.23	0.38	2.83	4.68	24.00	66.60
S2	80	65	24,89	24,74	0.29	0.44	1.93	2.93	22.20	63.00
S3	97	65	24,33	24,53	0.33	0.50	2.67	4.04	34.80	74.40

p é a intensidade da chuva simulada, t é o tempo da simulação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Taxa de infiltração de água no solo

A taxa de infiltração de água no solo é uma das principais variáveis a ser conhecida quando se analisa os fluxos de escoamento superficial. No local do estudo a determinação da taxa de infiltração de água no solo foi realizada pelo método com simulador de chuva (nas parcelas do tratamento T_{sem}) e pelo método dos anéis concêntricos. Na tabela 8 são apresentados os dados de intensidade de chuva aplicada ($mm h^{-1}$), duração da simulação (minutos) e as taxas de infiltração básica ($mm h^{-1}$) obtidas com o simulador e infiltrômetro de duplo anel. As curvas de infiltração são apresentadas na figura 18.

Tabela 8 – Taxas de infiltração básicas encontradas com o simulador com diferentes intensidades de precipitação (p) em T_{sem} e infiltrômetro de duplo anel obtidas da relação entre taxa de infiltração e tempo.

Simulação	p (mm h ⁻¹)	Duração (minutos)	Taxa de infiltração básica (mm h ⁻¹)			Média
			Repetições			
			1	2	3	
S1	80	120	29,95	29,95	24,62	28,17
S2	80	65	32,50	31,23	28,65	30,79
S3	97	65	33,05	40,24	44,32	39,20
Infiltrômetro de duplo anel	-	120	20,83	33,33	54,17	36,11
Média geral						33,57

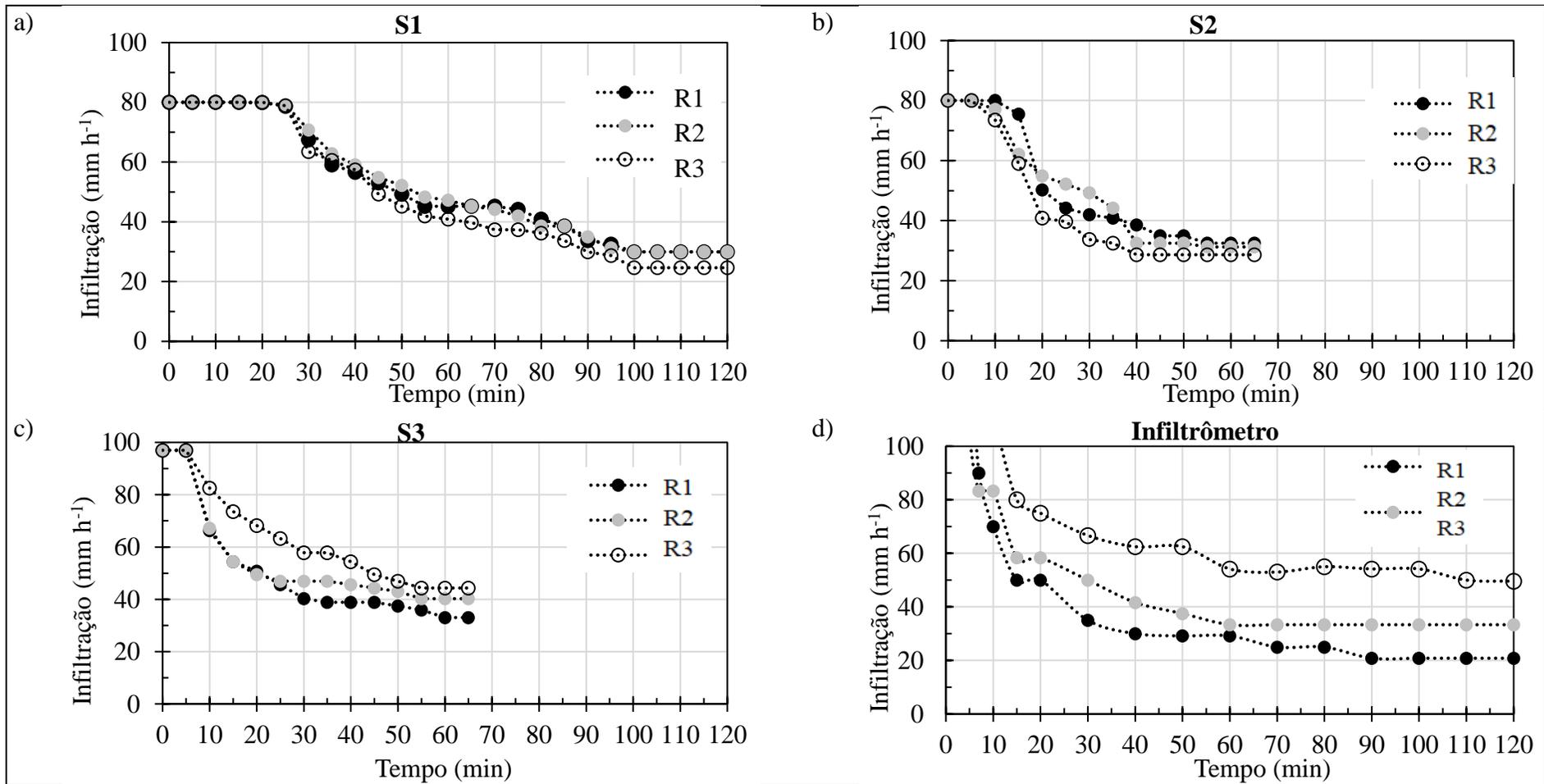
Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que não há grande diferença entre os valores médios encontrados da taxa de infiltração básica pelos dois métodos. Os dados resultantes do método do infiltrômetro de duplo anel possuem maior variação (20,83 a 54,17 mm h⁻¹) entre as repetições, o que é de se esperar devido a pequena área de solo amostrada nesse método. Com o método do simulador a variação dos dados entre as repetições foi menor, variando entre 28,65 e 44,32 mm h⁻¹.

Para o local do experimento foi encontrada taxa de infiltração básica de 33,57 mm h⁻¹. Segundo a teoria documentada em várias publicações como por exemplo em Hillel (1998) após 60 e 120 minutos a infiltração não deve ter atingido o equilíbrio e os dados aqui apresentados tendem a serem maiores do que deveriam.

De acordo com a teoria (GREEN & AMPT, 1911; PHILIP, 1957; HILLEL, 1998) a taxa de infiltração final se aproxima do valor constante o qual é a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s). Conforme a taxa de infiltração se aproxima desse valor constante (K_s) a infiltração acumulada também se aproxima da taxa constante de aumento ($\Delta I/\Delta t$, figura 19b) que também se aproxima de K_s .

Figura 18 – Curvas de infiltração obtidas por: a) simulador de chuva para S1; b) simulador de chuva para S2; c) simulador de chuva para S3; d) infiltrômetro de duplo anel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 9 são apresentados dados da taxa de infiltração básica calculados pela infiltração acumulada. Os valores foram derivados plotando a regressão linear nos últimos 5 pontos nas curvas de infiltração acumulada versus tempo para T_{sem} , ou seja, quando a taxa de aumento da infiltração acumulada era constante. A vantagem nesse caso é que os dados acumulados oscilam menos com relação aos da taxa de infiltração (compare as figuras 19a e 19b). Por esse método foram encontrados valores da taxa de infiltração básica entre 24,62 e 44,72 mm h^{-1} com o método do simulador de chuva, e valores entre 17,92 e 52,50 mm h^{-1} com o infiltrômetro de duplo anel. A variabilidade foi maior com uso do infiltrômetro pelas razões mencionadas anteriormente. O valor médio para os dados que é apresentado na tabela 9 é de 33,46 mm h^{-1} . O valor é similar ao encontrado pelos métodos de determinação da taxa de infiltração básica apresentados na tabela 8.

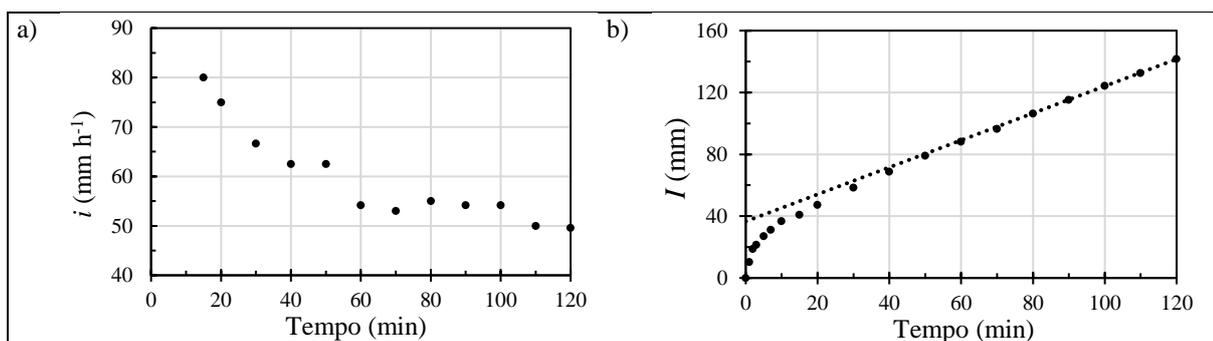
Tabela 9 – Taxas de infiltração básicas encontradas com o simulador com diferentes intensidades de precipitação (p) em T_{sem} e infiltrômetro de duplo anel obtidas da relação entre infiltração acumulada e tempo.

Simulação	p (mm h^{-1})	Duração (minutos)	Taxa de infiltração básica (mm h^{-1})			Média
			Repetições			
			1	2	3	
S1	80	120	30,13	30,04	24,62	28,26
S2	80	65	32,87	31,42	28,64	30,98
S3	97	65	34,73	40,66	44,72	40,03
Infiltrômetro de duplo anel	-	120	17,92	33,34	52,50	34,59
Média geral						33,46

p é a intensidade de precipitação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Curvas de infiltração obtidas pelo método do infiltrômetro. a) taxa de infiltração (i); b) infiltração acumulada (I).



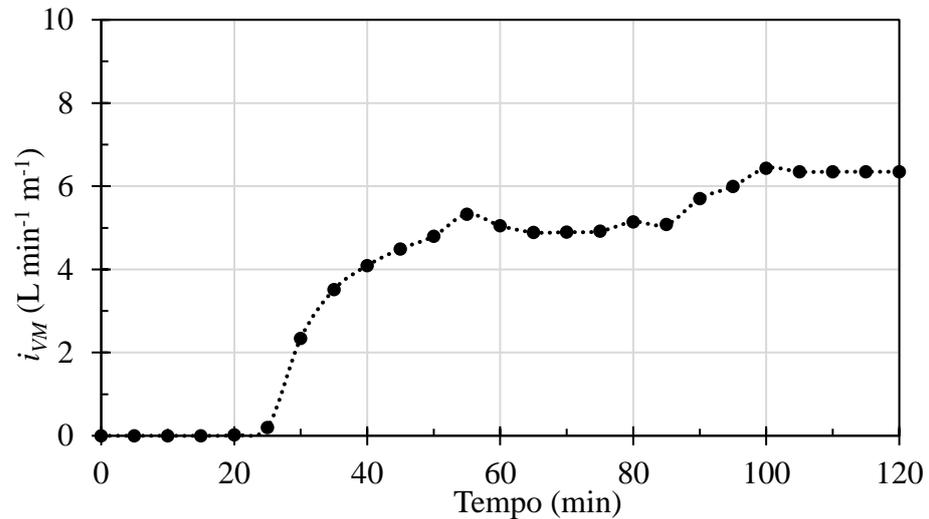
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3 Taxa de infiltração no vertical Mulching

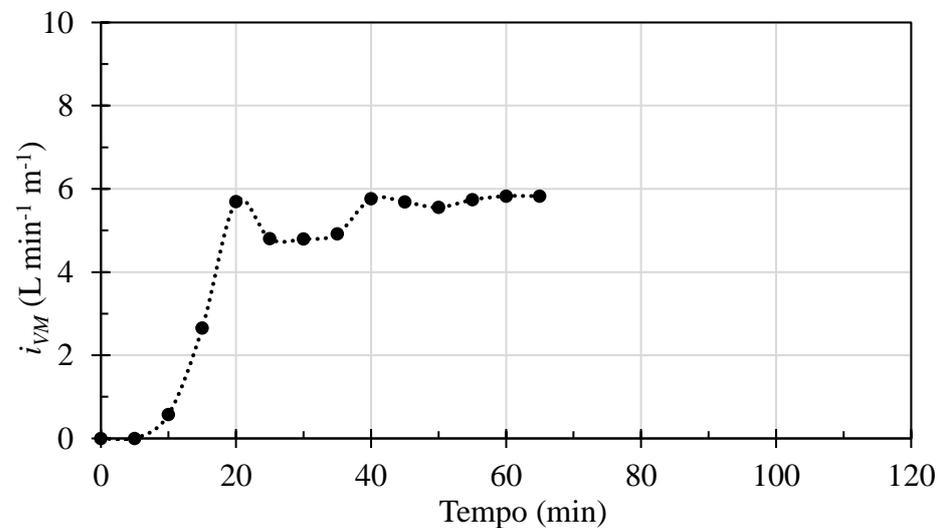
Na figura 20 são apresentados os gráficos da taxa de infiltração em T_{com} obtidas pela equação 9 em $L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$ de sulco. As curvas foram calculadas com os valores médios de e_{STcom} e e_{STsem} . Devido a variabilidade dos fatores físicos-hídricos do solo que interferem fortemente nos processos hidrológicos seria equivocado aplicar a equação 9 para as repetições. Isto por que, por exemplo a repetição 1 em e_{STcom} não necessariamente apresenta as mesmas condições da repetição 1 em e_{STsem} . Dessa forma utilizar valores médios suaviza essa variabilidade mencionada.

Figura 20 – Curvas de infiltração no vertical mulching. a) S1; b) S2; c) S3.

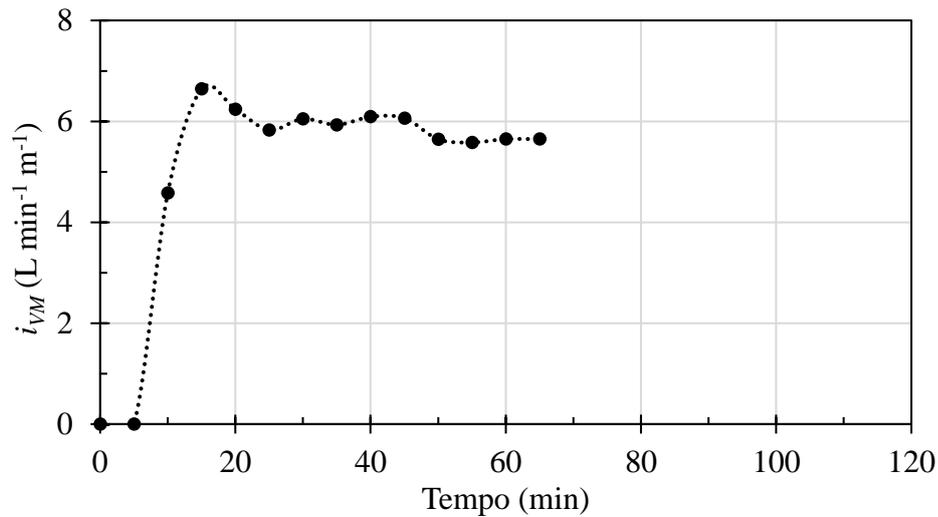
a) S1



b) S2



c) S3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas tabelas 10a e 10b são apresentados dados de i_{VM} em $L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$ de sulco e de escoamento superficial acumulado em $L \text{ m}^{-1}$ respectivamente. Com uso desses dados foi obtido média da taxa básica de infiltração de $5,94 L \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$ de sulco.

Tabela 10a – Taxas máximas de escoamento superficial extraídas das figuras 15, 16 e 17 e taxas de infiltração básica de água no VM (i_{VM}) extraídas dos últimos três pontos da figura 20.

Sim.	Taxa máxima do escoamento superficial L min ⁻¹ m ⁻¹ de sulco								i_{vm} básica L min ⁻¹ m ⁻¹ de sulco
	T _{sem}				T _{com}				
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
S1	18,35	18,35	20,31	19,00	6,84	6,30	5,79	6,31	6,35
S2	17,42	17,88	18,83	18,04	6,57	6,04	6,57	6,39	5,83
S3	23,45	20,81	19,31	21,19	10,91	8,90	9,88	10,91	5,65
Média									5,94

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10b – escoamento superficial acumulado para T_{com} e T_{sem} e infiltração acumulada em 1 m de sulco de VM (I_{vm}).

Sim.	Escoamento superficial acumulado								I_{vm} L m ⁻¹
	L m ⁻¹								
	T_{sem}				T_{com}				
	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
S1	1312	1286	1459	1352	408	373	328	370	491
S2	772	787	932	830	255	255	247	252	289
S3	1193	1096	874	1054	379	365	321	355	349
								Média	379

Fonte: Elaborado pelo autor.

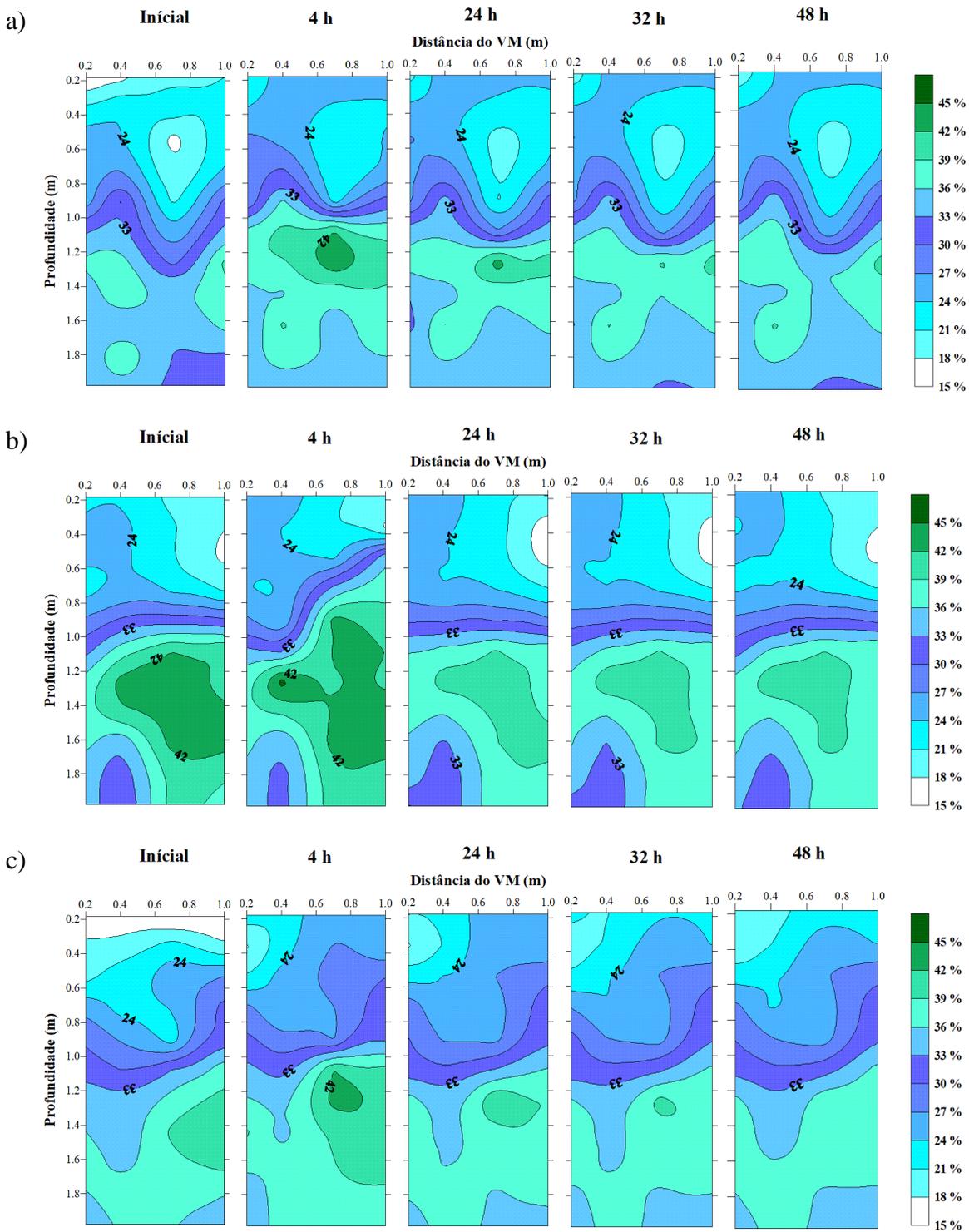
6.2.4 Distribuição de água no solo no entorno do sulco

Nas figuras 21, 22 e 23 são apresentados os perfis do conteúdo de água no solo em T_{com} , respectivamente para as simulações S1, S2 e S3. São apresentados os resultados das três repetições em cada simulação para os diferentes tempos de determinação, sendo eles inicial (realizado antes das simulações de chuva), 4, 24, 32 e 48 horas após a simulação de chuva.

O efeito da infiltração pode ser visto em todas as simulações de chuva e repetições com exceção do apresentado nas figuras 22b e 23b que após 4 horas não é possível visualizar diferenças no conteúdo de água no solo. Em cinco dos casos (figuras 21b, 21c, 22a, 22c e 23c) o efeito da infiltração desaparece no tempo de 24 horas e em outros 2 casos após 32 horas (figuras 21a e 23a).

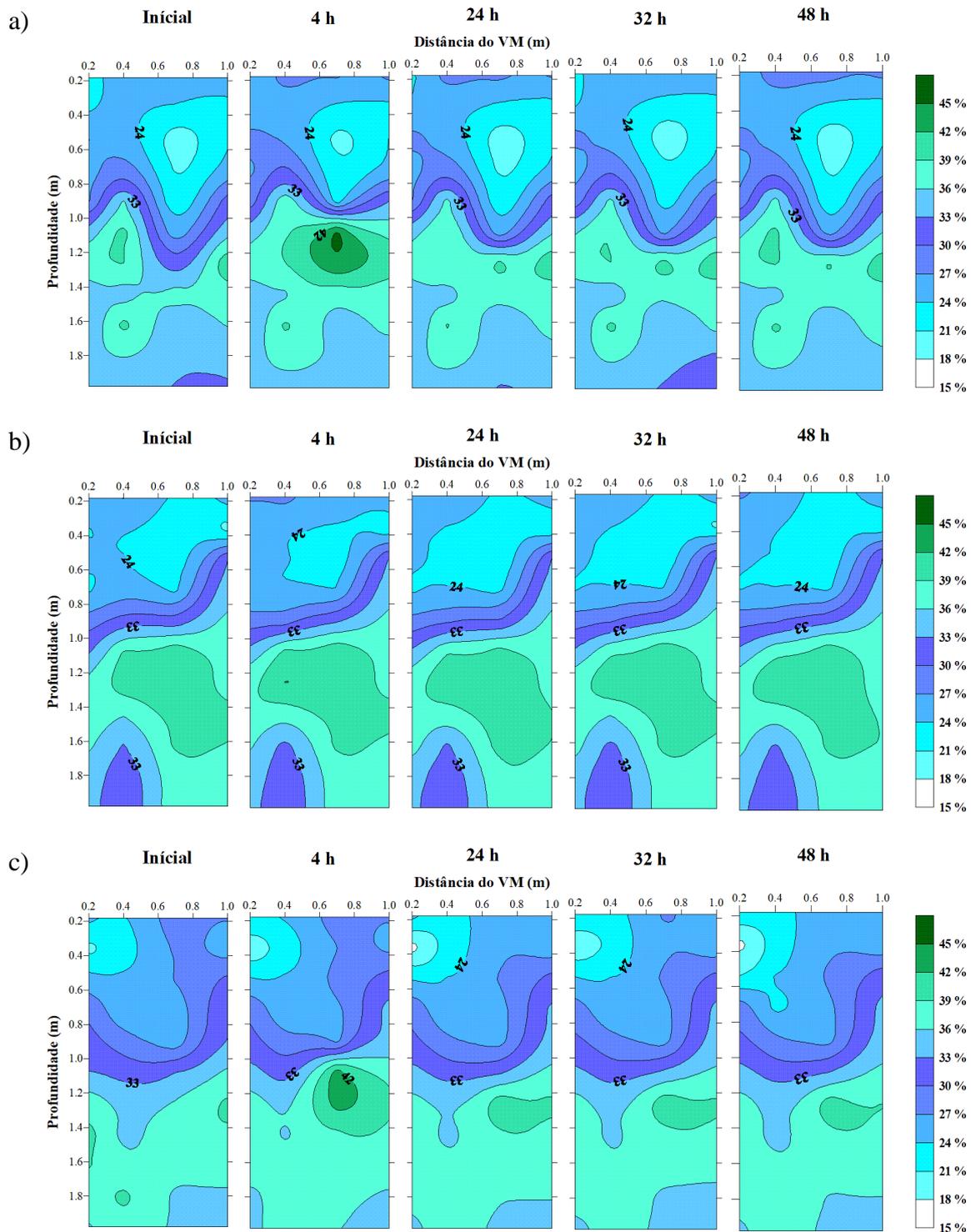
Entretanto não é possível observar o efeito do vertical mulching no conteúdo de água no solo após 4 horas. Caso houvesse esse efeito positivo no aumento do conteúdo de água no solo na região monitorada do solo, se esperaria observar aumento significativo do conteúdo de água nas profundidades de 0,2 e 0,4 metros o que não acontece. Isso significa que o movimento de água no solo ocorre rapidamente e o vertical mulching não aumentou o conteúdo de água no solo na região monitorada. Todavia aumentando a quantidade de água que infiltra a técnica contribui para o abastecimento de águas subterrâneas e reduz o escoamento superficial.

Figura 21 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S1. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3.



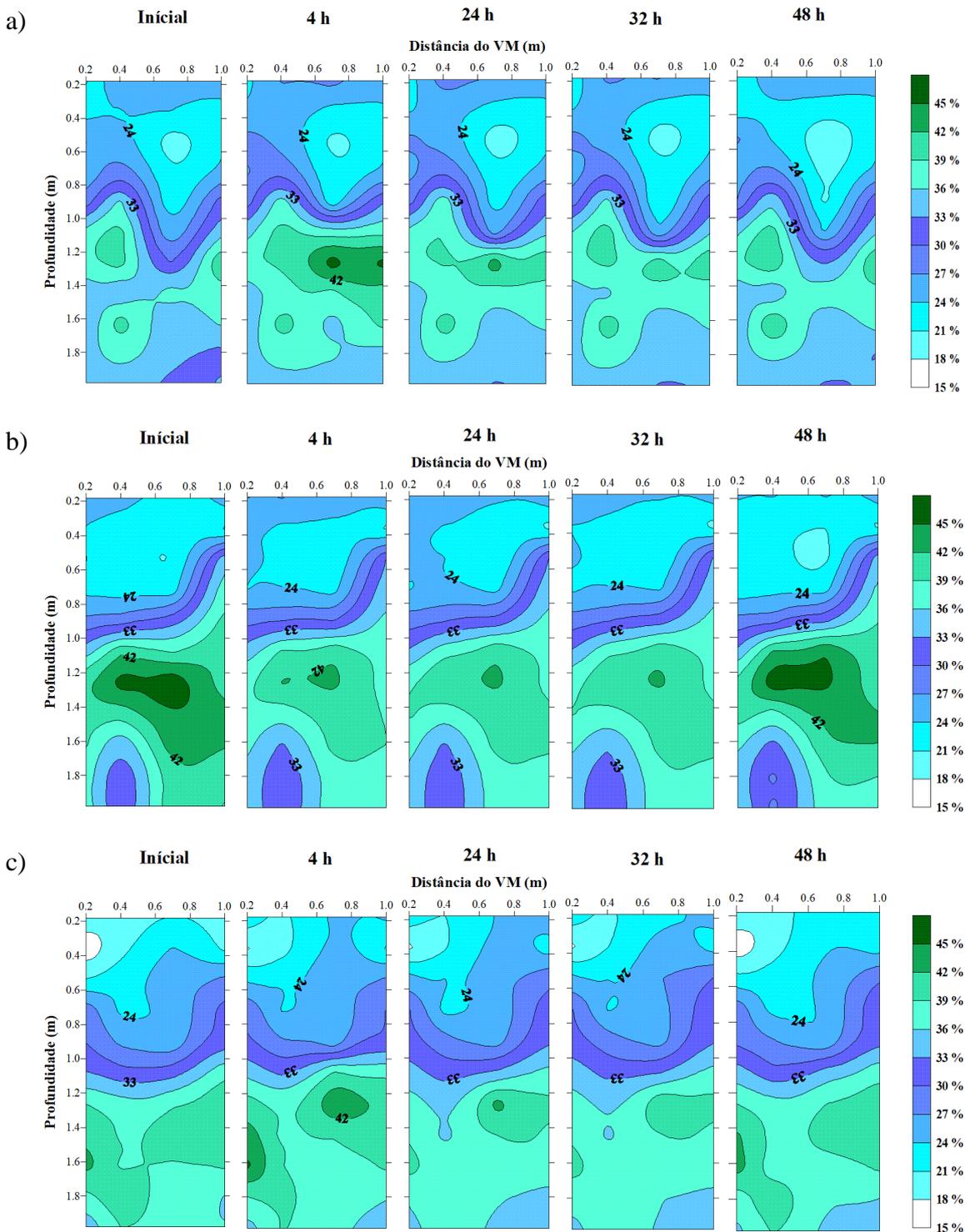
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S2. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos em T_{com} para S3. a) repetição 1; b) repetição 2; c) repetição 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

6.3.1 Escoamento superficial

Para utilizar o modelo descrito e desenvolvido por GA-ML é necessário obter valores para K_s e τ (tensão matricial na frente de molhamento). O método utilizado foi pela calibração direta no modelo. Para isso foram inseridos valores de K_s (partindo de 33,15 mm h⁻¹ encontrado pela relação da infiltração acumulada e tempo discutida no item 6.2.2) e de τ , buscando o melhor ajuste com os dados observados. Nessa etapa buscou-se o melhor ajuste para cada uma das repetições.

Na tabela 11 são apresentados os valores encontrados para K_s e τ por meio do melhor ajuste do modelo. Os valores de *PBIAS* estão entre -1,95 e 1,75%. Segundo Moriasi et al. (2007) valores de *PBIAS* entre $\pm 10\%$ são ajustes considerados como muito bons.

Tabela 11 – Valores obtidos de K_s e τ para cada uma das repetições por meio da calibração do modelo GA-ML.

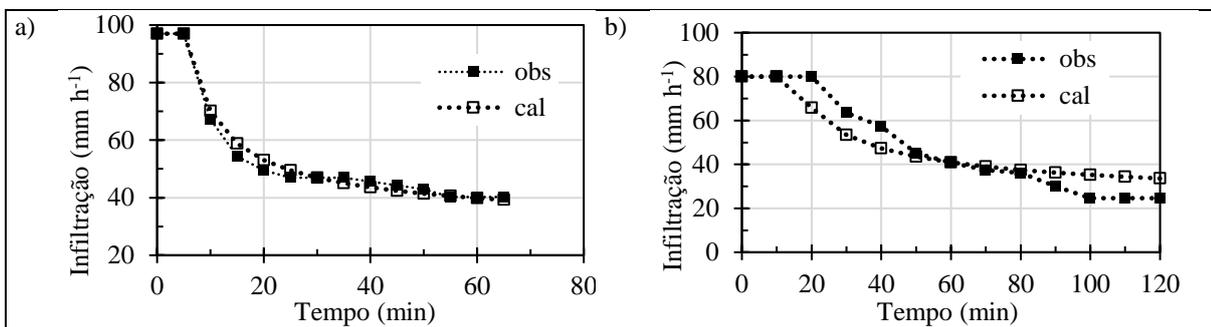
Simulação	Repetição	K_s (mm h ⁻¹)	τ (cm)	<i>PBIAS</i> (%)	<i>NSE</i>
S1	R1	25,0	35,2	1,48	0,92
	R2	25,0	41,0	0,22	0,90
	R3	22,0	37,6	0,44	0,87
S2	R1	20,0	30,8	-1,92	0,92
	R2	22,1	33,7	-0,36	0,94
	R3	20,0	27,6	1,75	0,93
S3	R1	26,0	18,7	1,42	0,99
	R2	29,1	22,7	0,66	0,99
	R3	28,0	32,7	-1,95	0,95
Média	-	24,1	31,1	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 24 são apresentados o pior e o melhor entre esses ajustes. Os valores de K_s variaram entre 20,0 e 29,1 mm h⁻¹ com valor médio de 24,1 mm h⁻¹. Considerando que muitos processos influenciam o parâmetro K_s essa variabilidade é considerada normal e plausível. Para τ foram encontrados valores que variam entre 18,7 e 41,0 cm e média de 31,1 cm. Essa dispersão dos valores de K_s e τ reflete a variabilidade desses parâmetros justificando a adoção de valores médios.

Rawls et al. (1982) realizaram estudos analisando dados de 1.323 solos e 5.350 horizontes em 32 estados dos Estados Unidos. Os autores objetivaram obter valores médios das propriedades hídricas para diferentes tipos de solo. Para o solo semelhante ao do presente estudo (franco arenoso) Rawls et al. (1982) encontraram valores médios de K_s igual a 25,9 mm h^{-1} e τ igual a 30,2 cm, valores próximos aos obtidos pela calibração do modelo nesta pesquisa.

Figura 24 – Curvas de calibração do modelo GA-ML. a) S3_R2 (melhor ajuste); b) S1_R2 (pior ajuste).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 25 ilustra a sensibilidade do modelo GA-ML a esses dois parâmetros. No teste de sensibilidade os parâmetros foram variados com fatores percentuais variando de 0,6 a 1,4, com incremento de 0,1 em relação aos valores de K_s e τ calibrados (24,1 mm h^{-1} e 31,1 cm respectivamente). Para essa análise de sensibilidade foram utilizados valores fixos de conteúdo inicial de água ($\theta_i = 24\%$ -vol.), conteúdo saturado de água no solo ($\theta_s = 34\%$ -vol.) e intensidade de chuva ($p = 66 \text{ mm h}^{-1}$). Na figura 25a é apresentado os resultados onde apenas o valor de K_s foi alterado na ordem de 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,1; 1,2; 1,3 e 1,4%. Em 25b apenas τ foi variado na mesma proporção.

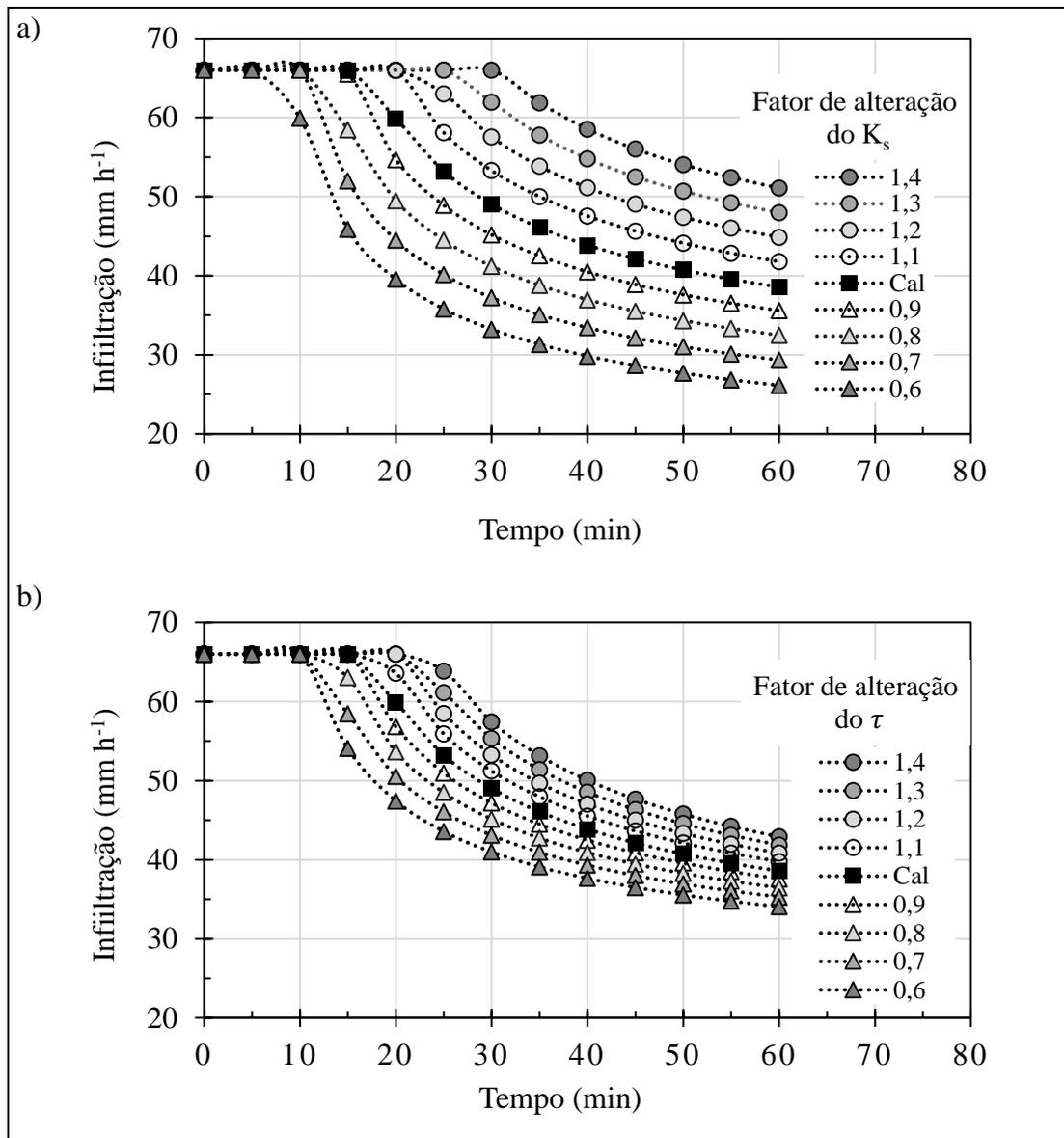
Para K_s maiores valores indicam maior infiltração. Maiores valores absolutos de τ também resultam em maior infiltração. A diferença na sensibilidade desses dois parâmetros no modelo está na magnitude com que influenciam o processo de infiltração, sendo o parâmetro K_s aquele que provoca maior sensibilidade.

A adoção de valores médios do processo de calibração para K_s e τ é válido, pois como mencionado anteriormente esses parâmetros possuem elevada variabilidade e a adoção de valores médios é a mais prudente para a modelagem neste estudo. Na figura 26 são apresentados o melhor e o pior ajuste encontrados com os parâmetros médios de K_s e τ

calibrados (24 mm h^{-1} e $31,1 \text{ cm}$ respectivamente). Os demais casos são apresentados no apêndice D.

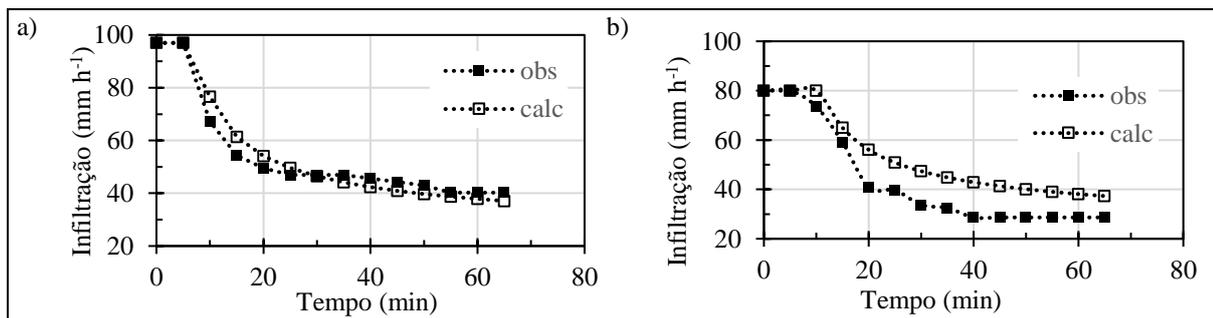
Na tabela 12 são apresentados os valores de *PBIAS* e *NSE* para essa condição. Segundo a classificação da tabela 3, sete dos ajustes são classificados como muito bons, um dos ajustes é classificado apenas como bom e um como satisfatório.

Figura 25 – Sensibilidade do modelo de GA-ML. a) Sensibilidade ao parâmetro K_s ; b) sensibilidade ao parâmetro τ . Todos cálculos foram realizados com $\theta_i = 24\% \text{-vol}$, $\theta_s = 34\% \text{-vol}$, e $p = 66 \text{ mm h}^{-1}$. O valor padrão para K_s foi de $24,1 \text{ mm h}^{-1}$ e para τ foi de $31,1 \text{ cm}$. Esses valores foram alterados por um fator que variou de 0,6 a 1,4.



Os valores de K_s e τ como mencionado anteriormente influenciam a infiltração na mesma direção (para maiores ou menores valores). Se esses parâmetros forem elevados a taxa de infiltração calculada será muito alta. Se eles forem baixos a taxa de infiltração também será baixa. Se ambos parâmetros estiverem muito altos ou baixos ao mesmo tempo, seu efeito individual na taxa de infiltração será potencializado. Conforme mencionado anteriormente Rawls et al. (1982) em seu estudo obtiveram valores médios para K_s e τ para onze classes texturais do solo para o USDA (do inglês *United States Department of Agriculture*) apresentados na forma de triângulo de textura do solo. A análise de correlação entre os dados de K_s e τ mostra que se K_s aumenta, τ diminui e vice-versa. Assim, os efeitos dos dois parâmetros na taxa de infiltração calculada tendem a se anular em vez de se amplificarem. Isso, por sua vez, significa que a sensibilidade do modelo GA-ML aos parâmetros K_s e τ é menor do que a figura 25 sugere.

Figura 26 – Comparação do modelo GA-ML com os parâmetros K_s e τ calibrados com os dados observados. a) S3_R2 (melhor ajuste); b) S2_R3 (pior ajuste).



Fonte: Elaborado pelo autor.

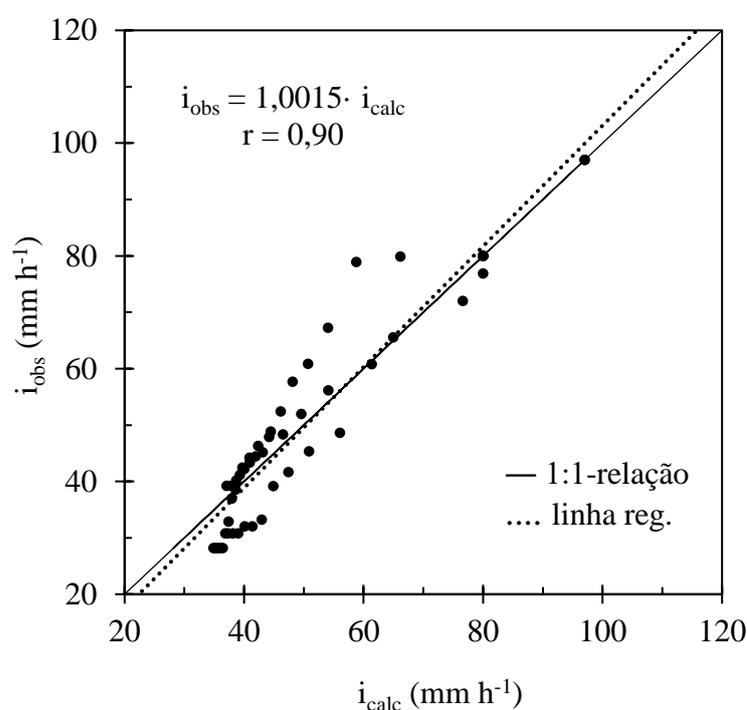
Tabela 12 – Valores de *PBIAS* e *NSE* obtidos para cada repetição com valores médios de K_s e τ calibrados.

Simulação	Repetição	<i>PBIAS</i> (%)	<i>NSE</i>
S1	R1	-4,80	0,85
	R2	-5,83	0,82
	R3	1,57	0,85
S2	R1	6,35	0,92
	R2	7,57	0,91
	R3	21,55	0,71
S3	R1	7,88	0,95
	R2	0,45	0,95
	R3	-13,39	0,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 27 é apresentada a análise de dispersão entre a infiltração observada e calculada pelo modelo assim como a indicação do coeficiente de correlação linear de Pearson (r). Foi obtido r de 0,90 e declividade próximo a 1, o que também representa bom ajuste na calibração. Como pode ser observado nessa figura, a distribuição dos dados é uniforme no entorno da linha 1:1, o que é outra evidência do bom ajuste.

Figura 27 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de taxa de infiltração observados (i_{obs}) e calculados (i_{calc}) pelo modelo com os valores médios de K_s e τ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de K_s e τ obtidos são coerentes. O importante nessa etapa foi assumir valores de K_s e τ plausíveis para obter dados confiáveis das simulações. Para o modelo de Green e Ampt (1911) modificado por Mein e Larson (1973) foram adotados K_s igual a 24,1 mm h^{-1} e τ 31,1 cm.

Com o modelo calibrado satisfatoriamente foram realizadas simulações para valores de θ_i igual a 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. (que foram extraídos dos dados do teste de drenagem) e intensidades de chuva de 40, 60, 80, 100 e 120 mm h^{-1} . Dessa forma foi possível obter o escoamento em litros para essas condições. Nos quadros 3, 4 e 5 são apresentados o volume

total escoado em $L m^{-2}$ para os tempos de chuva de 20, 60 e 120 minutos e diferentes condições de umidade inicial do solo.

Quadro 3 – Escoamento superficial acumulado ($L m^{-2}$) para diferentes intensidades de chuva e diferentes valores de conteúdo inicial de água no solo (θ_i) no tempo de a) 20 minutos, b) 60 minutos e c) 120 minutos.

a) 20 minutos

θ_i (%-vol.)	Chuva ($mm h^{-1}$)				
	40	60	80	100	120
16	0	0	0,04	3	8
20	0	0	1	5	10
24	0	0	2	7	13
28	0	1	5	11	17
32	0,2	5	11	17	24

b) 60 minutos

θ_i (%-vol.)	Chuva ($mm h^{-1}$)				
	40	60	80	100	120
16	0	3	17	34	53
20	0	5	21	39	58
24	0	9	26	45	65
28	1	15	33	53	72
32	6	25	44	64	84

c) 120 minutos

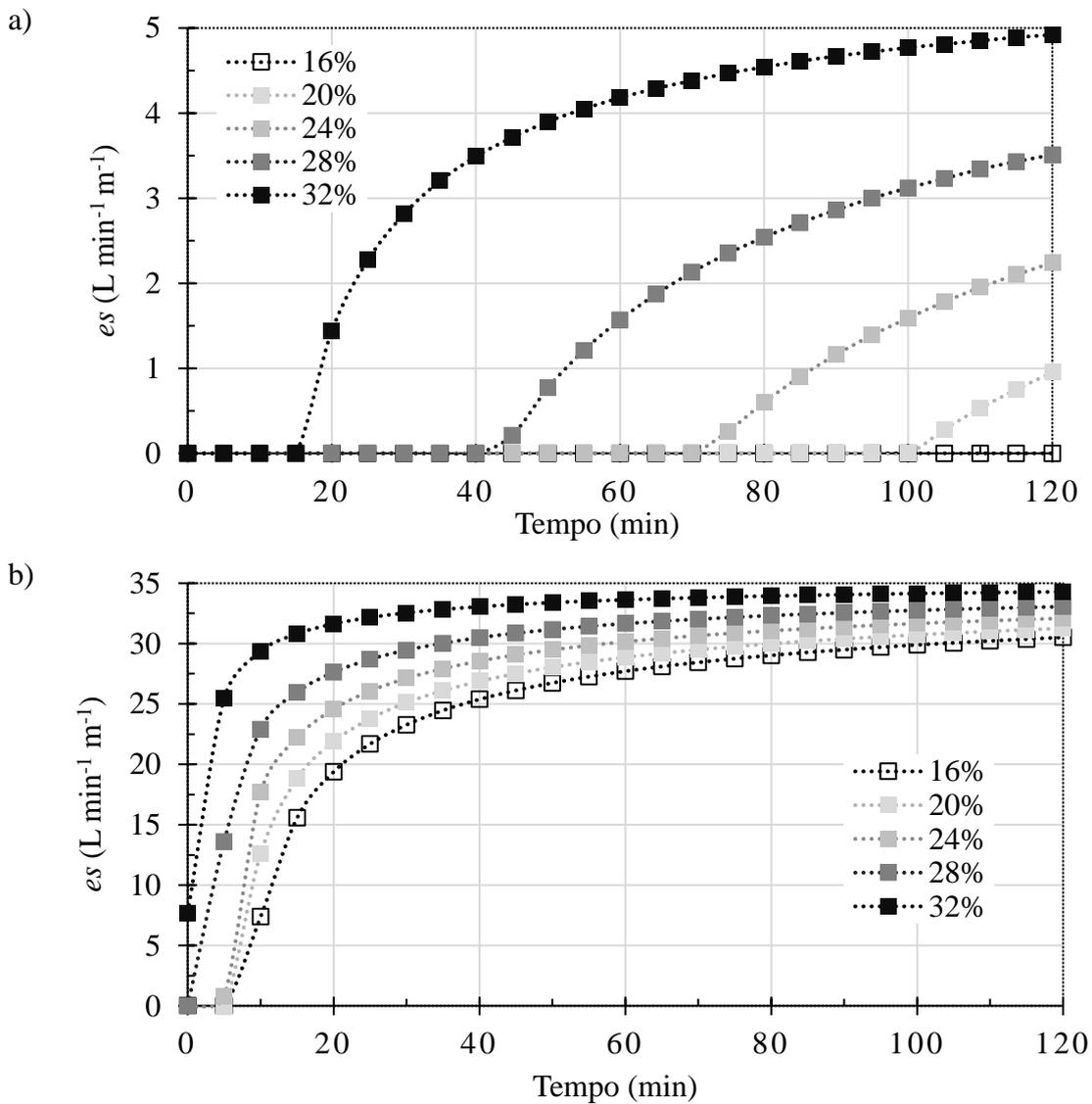
θ_i (%-vol.)	Chuva ($mm h^{-1}$)				
	40	60	80	100	120
16	0	21	56	94	133
20	0,5	27	63	102	141
24	3	34	72	110	150
28	8	43	82	121	161
32	19	57	97	137	177

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas informações são importantes para realizar a análise do espaçamento entre sulcos, pois com o conhecimento do volume de água escoado, para diferentes condições de conteúdo inicial de água no solo e de chuva é possível definir quanto de água a técnica do VM precisa interceptar. Sabe-se que quanto maior θ_i , maior é o volume escoado superficialmente.

Essa situação é melhor de ser observada nos gráficos de escoamento. Na figura 28 são apresentados os gráficos para as intensidades de chuva de 40 e 120 mm h⁻¹ com 120 minutos de duração. Os gráficos, nesse caso, estão com escalas diferentes no eixo y para melhor identificação desse comportamento. No apêndice E são apresentados todos os gráficos.

Figura 28 – Taxa de escoamento superficial (es) para diferentes valores de θ_i (% de volume) e duração de 120 minutos. a) Chuva de 40 mm h⁻¹; b) Chuva de 120 mm h⁻¹. Observe as diferentes escalas nos eixos y.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2 Espaçamento entre sulcos

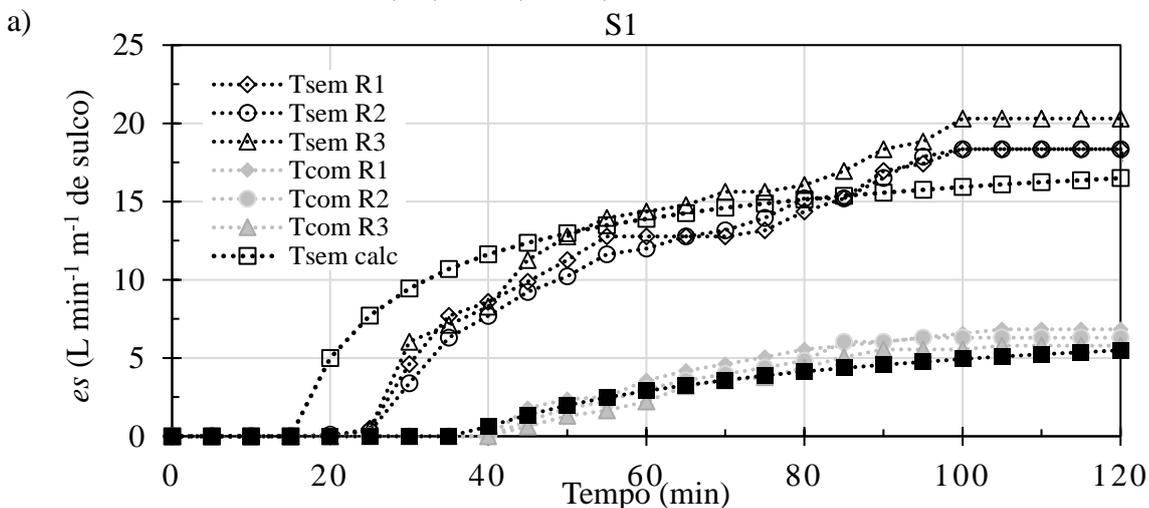
A análise do espaçamento entre sulcos para condições de chuva intensa, com 20 anos de tempo de retorno, foi realizada com uso do modelo GA-ML calibrado anteriormente e modificado com a equação 20. Dessa forma foi possível simular o escoamento residual após o sulco para diferentes condições de conteúdo inicial de água no solo, espaçamentos entre sulcos e intensidades de precipitação.

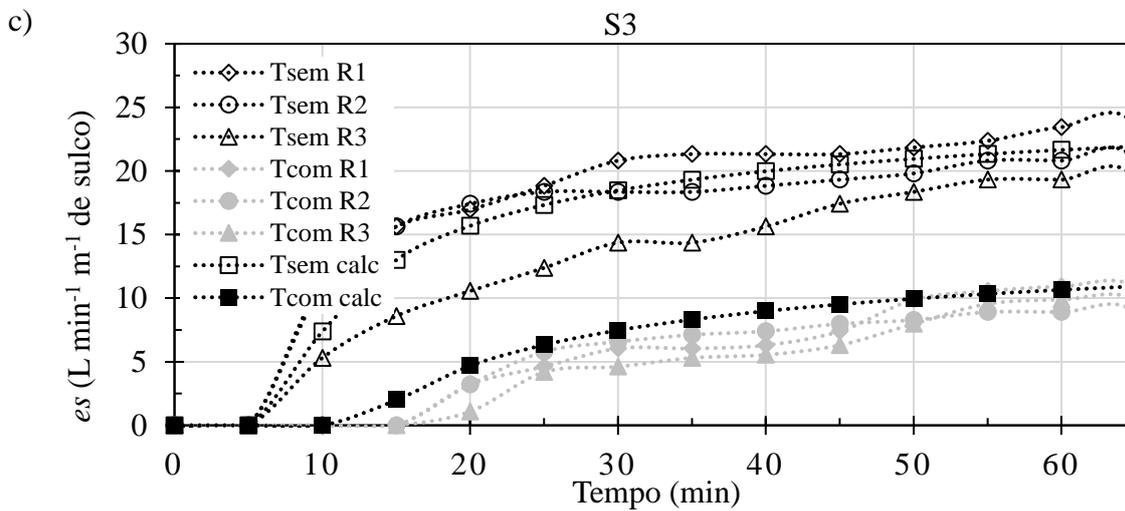
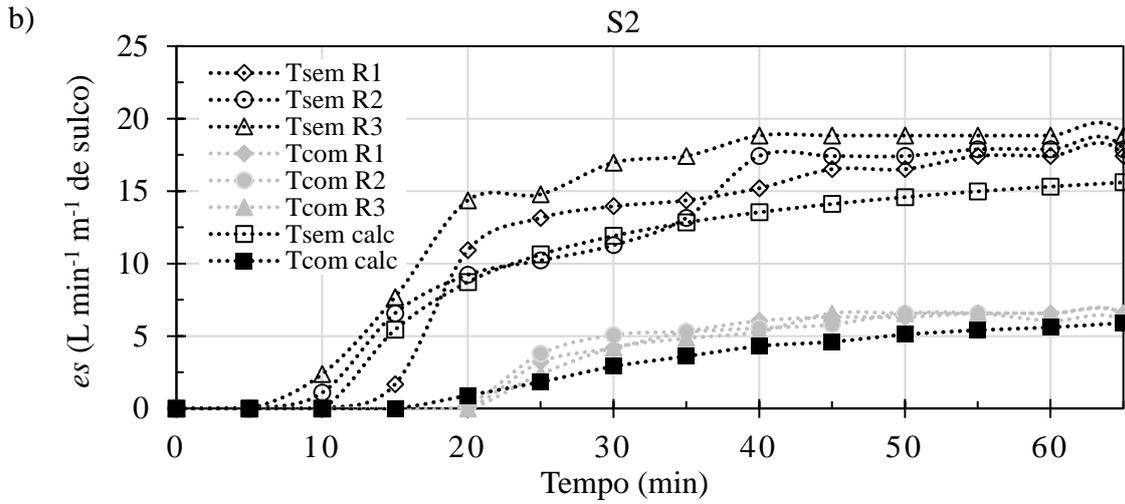
Primeiramente foi realizada a verificação do modelo. Essa etapa consistiu em analisar se com uso da equação 20 pode-se simular os dados observados em T_{com} . Anteriormente foi mostrado que com uso dos valores de K_s e τ calibrados pode-se representar de forma confiável os dados observados em T_{sem} . Entretanto foi realizada aqui novamente essa verificação.

Na figura 29 são apresentados os dados de escoamento superficial observados e os calculados pelo modelo para T_{sem} e T_{com} . Observa-se que as curvas de escoamento gerados pelo modelo para T_{com} sobrepõem as curvas observadas a campo para o mesmo tratamento. Isso indica que a equação desenvolvida (equação 20) é capaz de reproduzir as condições de campo. Situação comprovada com a análise estatística.

Na tabela 13 são apresentados os valores de *PBIAS* (%) e *NSE* calculados com a média dos dados observados para T_{com} e T_{sem} e os dados gerados pelo modelo. Na figura 30 são apresentados a análise de dispersão entre os dados observados e calculados.

Figura 29 – Taxa de escoamento superficial (es) em T_{com} e T_{sem} observados com três repetições e calculados com os parâmetros calibrados do modelo ($K_s = 24,1 \text{ mm h}^{-1}$ e $\tau = 31,1 \text{ cm}$). a) S1; b) S2; c) S3.





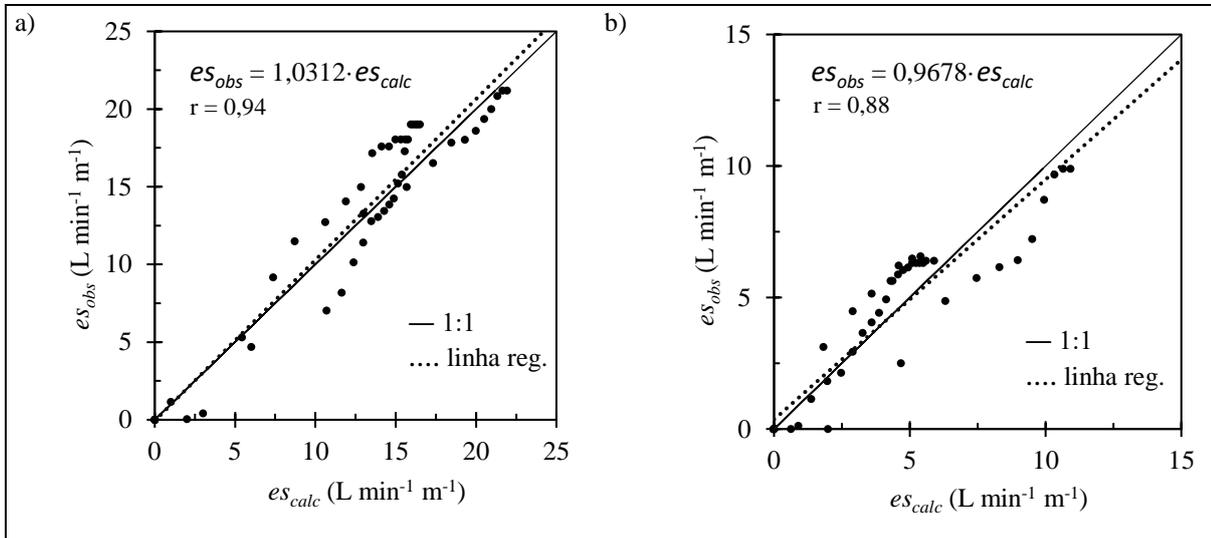
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Valores de *PBIAS* e *NSE* para os ajustes do modelo em T_{com} e T_{sem} .

Simulação	<i>PBIAS</i> (%)		<i>NSE</i>	
	T_{com}	T_{sem}	T_{com}	T_{sem}
S1	13,41	-4,94	0,93	0,85
S2	5,46	3,22	0,86	0,88
S3	-8,96	-3,10	0,83	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de taxa de escoamento superficial observados (es_{obs}) e calculados (es_{calc}) por 1 m de sulco. a) T_{sem} ; b) T_{com} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi apresentado no item anterior o bom ajuste do modelo para os dados observados em T_{sem} . Novamente esse bom ajuste foi apresentado, agora com valores médios para cada simulação de chuva observada. Com valores de *PBIAS* variando entre -8,96 e 13,41% e valores de *NSE* variando entre 0,83 e 0,93 o modelo desenvolvido para simular o escoamento em T_{com} apresenta ajuste de muito bom a bom segundo classificação apresentada na tabela 3. A análise de dispersão também indica esse bom ajuste. Aqui, também, a distribuição dos dados é uniforme no entorno da linha 1:1, o que é outra evidência do bom ajuste. O coeficiente linear de Pearson para T_{sem} foi de 0,90 e para T_{com} de 0,88 e a declividade das linhas de regressão são próximas a 1. Isso mostra que a metodologia adotada para o cálculo do escoamento superficial residual após o vertical mulching (equação 20) é válida e o modelo apresenta resultados confiáveis.

Nos quadros 4a, 4b e 4c são apresentados os resultados de *ES* total em $L \cdot m^{-1}$ de sulco respectivamente para as chuvas intensas com durações de 20, 60 e 120 minutos e tempo de retorno de 20 anos. Os espaçamentos entre sulcos avaliados foram de 5, 10, 15, 20 e 25 m com valores de conteúdo inicial de água no solo de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol.

Para chuva com duração de 120 minutos e intensidade de $41,76 \text{ mm h}^{-1}$ (Quadro 4c) houve escoamento superficial apenas para a condição com espaçamento de 25 m e θ_i igual a 32%-vol. Para a chuva de 60 minutos e intensidade de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ (Quadro 4b) os

espaçamentos de 5 e 10 metros detiveram o escoamento por completo, com exceção da condição com θ_i igual a 32% -vol no espaçamento de 10 metros. Garcia e Righes (2008) obtiveram resultados semelhantes. Os autores concluíram que o VM em latossolo vermelho distrófico típico com espaçamento entre sulcos de 10 m pode controlar totalmente o escoamento superficial com intensidade de chuva de 70 mm h⁻¹ com duração de 60 minutos.

Neste estudo o espaçamento de 15 metros apresentou bom desempenho para condições de baixo conteúdo inicial de água no solo. Para a chuva de 20 minutos e intensidade de 124 mm h⁻¹ (Quadro 4a) sob todos os espaçamentos entre sulcos houve escoamento, com exceção do espaçamento de 5 m para umidades iniciais de 16 e 20%-vol. Para as chuvas de grande intensidade e pequena duração o VM tem sua eficiência reduzida em deter o *ES* para as condições do local de estudo.

Verifica-se que o problema para conter chuvas extremas se dá para chuvas de elevada intensidade e curta duração onde mesmo para o espaçamento de 5 metros entre sulcos há escoamento superficial para valores de conteúdo inicial de água no solo acima de 24%-vol.

Embora ainda haja escoamento superficial para algumas dessas condições, o VM é capaz de reduzir consideravelmente as perdas de água. Para a chuva de 124 mm h⁻¹ com duração de 20 minutos e θ_i de 16%-vol (Quadro 4a) o VM diminuiu as perdas de água em 100, 74, 54, 41 e 32%-vol. respectivamente nos comprimentos de rampa de 5, 10, 15, 20 e 25 m (Observação: como em T_{sem} não há VM aqui adotou-se a nomenclatura comprimento de rampa ao invés de espaçamento entre sulcos). Com condição de conteúdo inicial de água no solo inicial elevado ($\theta_i = 32\%$) e mesma intensidade e duração de chuva a redução nas perdas de água foi de 79, 40, 26, 20 e 16% respectivamente para os mesmos comprimentos de rampa. Esses dados demonstram que embora a técnica do VM não seja capaz de eliminar as perdas de água por completo para chuvas intensas de curta duração, a eficiência na prevenção do escoamento superficial é elevada.

Na figura 31 são apresentados valores do escoamento superficial total acumulado para T_{sem} e T_{com} nas condições de conteúdo inicial de água de 16 e 32%-vol e intensidade de chuva de 124 mm h⁻¹.

Quadro 4 – escoamento superficial total (*ES* em L m⁻¹ de sulco) e redução no escoamento superficial comparado as mesmas condições sem vertical mulching (Red. em %) para diferentes espaçamentos de sulco e diferentes valores de conteúdo inicial de água no solo (θ_i). a) com intensidade de chuva de 124 mm h⁻¹ com duração de 20 minutos, b) com intensidade de chuva de 65,83 mm h⁻¹ com duração de 60 minutos e c) com intensidade de chuva de 41,76 mm h⁻¹ com duração de 120 minutos.

a)

θ_i (%-vol.)	Espaçamento entre sulcos (m)									
	5		10		15		20		25	
	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red..	<i>ES</i>	Red.
16	0,0		21,8	74,2	58,0	54,3	100,2	40,7	142,5	32,5
20	0,0		37,2	64,9	90,1	43,3	143,1	32,5	196,0	26,0
24	1,1	98,4	58,8	56,5	122,6	39,6	186,3	31,1	250,0	26,0
28	6,6	93,0	90,1	51,6	183,4	34,4	276,6	25,8	369,8	20,7
32	24,9	79,5	146,0	39,7	267,2	26,5	388,3	19,9	509,5	15,9

b)

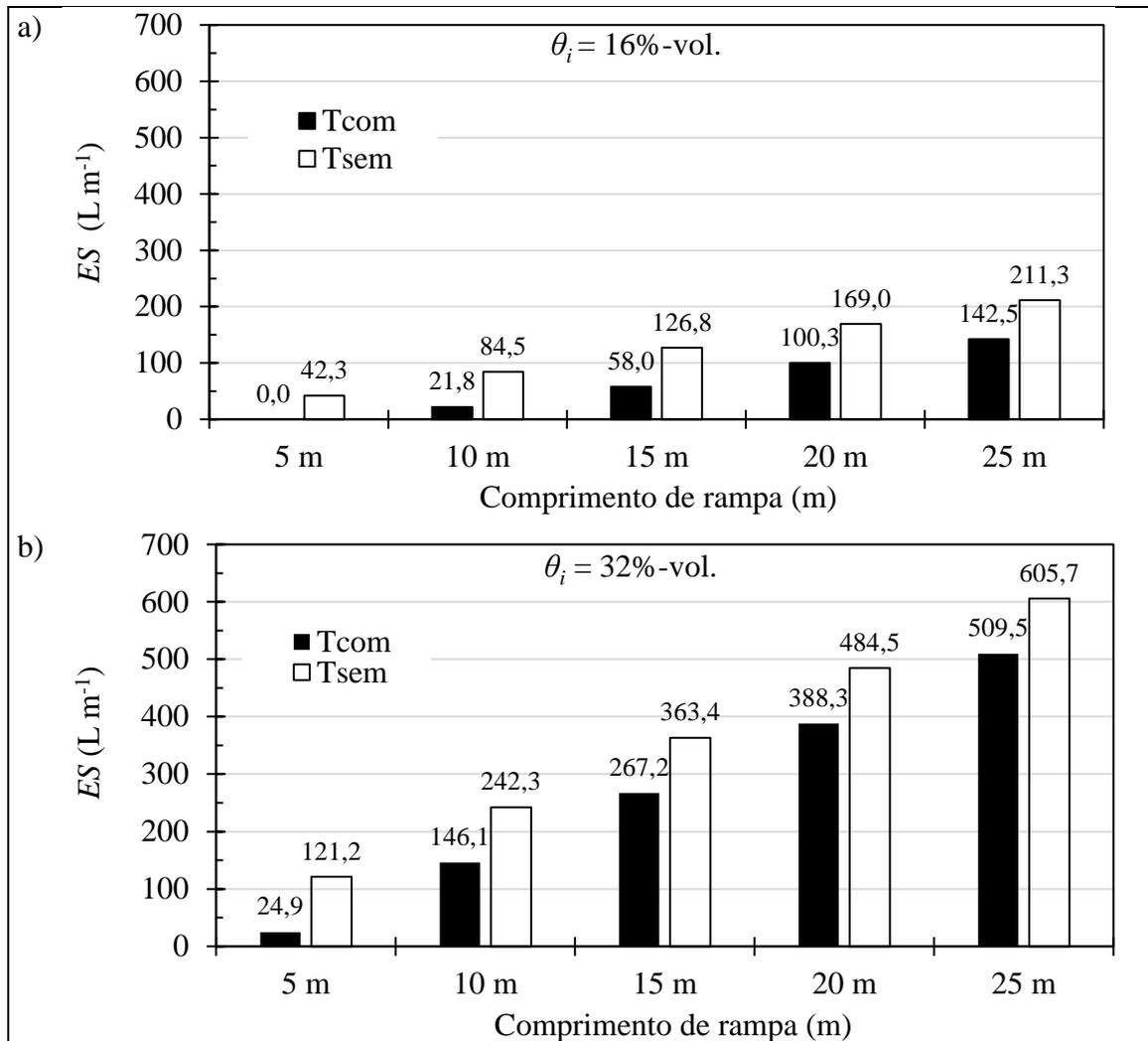
θ_i (%-vol.)	Espaçamento entre sulcos (m)									
	5		10		15		20		25	
	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red..	<i>ES</i>	Red.
16	0,0		0,0		0,0		3,7	96,9	19,4	86,7
20	0,0		0,0		0,7	99,5	23,6	87,3	59,3	74,4
24	0,0		0,0		14,8	92,9	66,9	75,8	128,3	62,9
28	0,0		0,0		56,0	81,4	147,0	63,3	242,0	51,7
32	0,0		17,8	94,1	153,8	66,0	301,4	50,0	448,9	40,5

c)

θ_i (%-vol.)	Espaçamento entre sulcos (m)									
	5		10		15		20		25	
	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red.	<i>ES</i>	Red..	<i>ES</i>	Red.
16	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
20	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
24	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
28	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
32	0,0		0,0		0,0		0,0		36,3	93,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

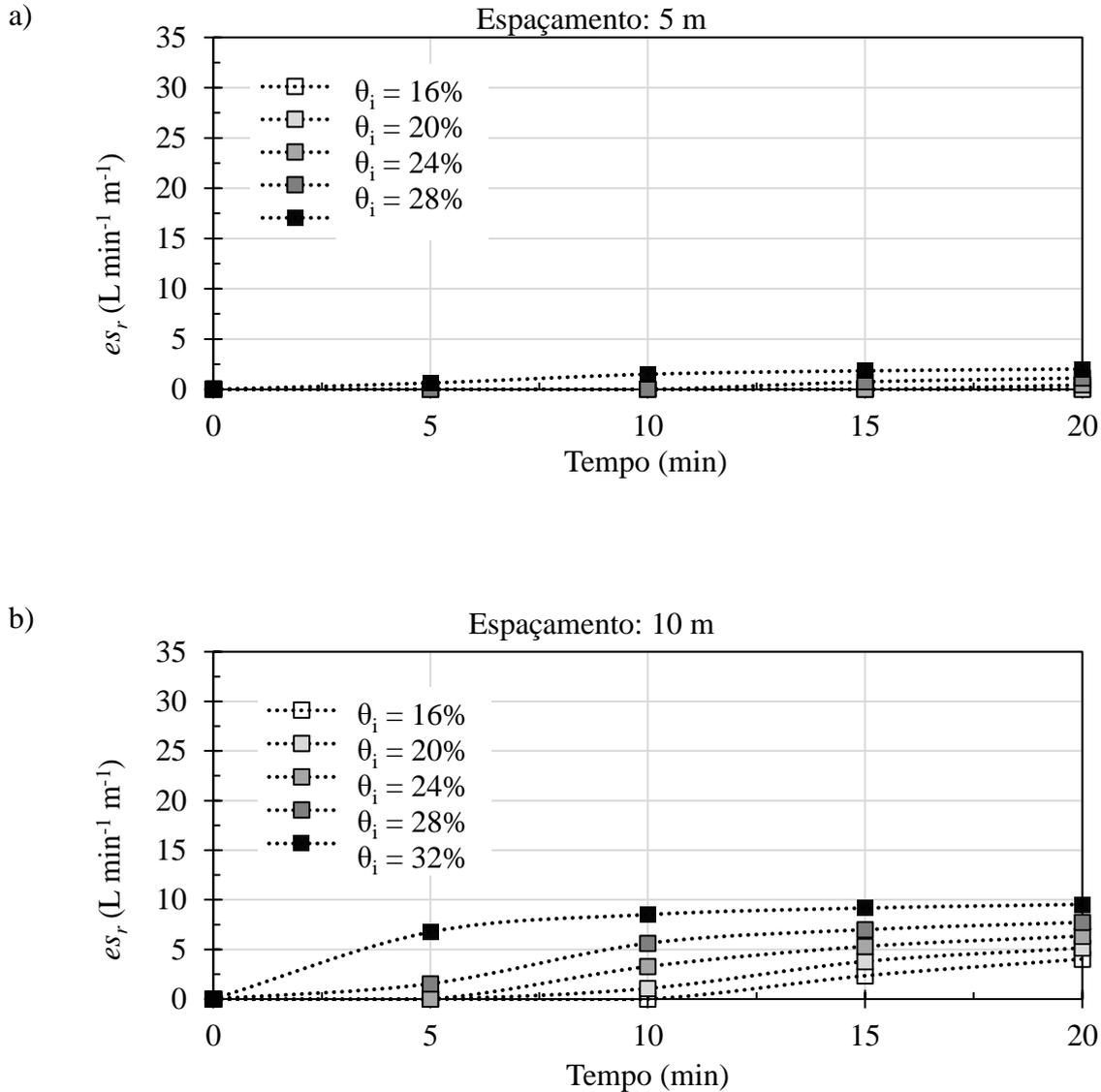
Figura 31 – Escoamento superficial acumulado (ES) para T_{com} e T_{sem} calculados pelo modelo GA-ML para diferentes comprimentos de rampa com intensidade de chuva de 124 mm h^{-1} com duração de 20 minutos: a) $\theta_i = 16\%$ -vol.; b) $\theta_i = 32\%$ -vol.



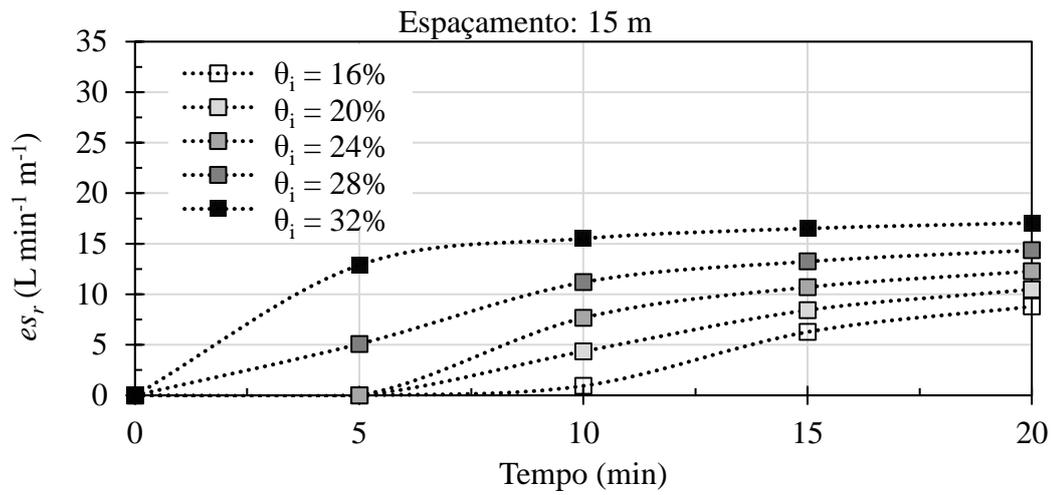
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas figuras 32 e 33 são apresentados os gráficos de escoamento obtidos para as chuvas de intensidade de 124 mm h^{-1} com duração de 20 minutos e $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ com duração de 60 minutos respectivamente. Para a chuva de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ não houve escoamento superficial na condição de espaçamento entre sulcos de 5 m.

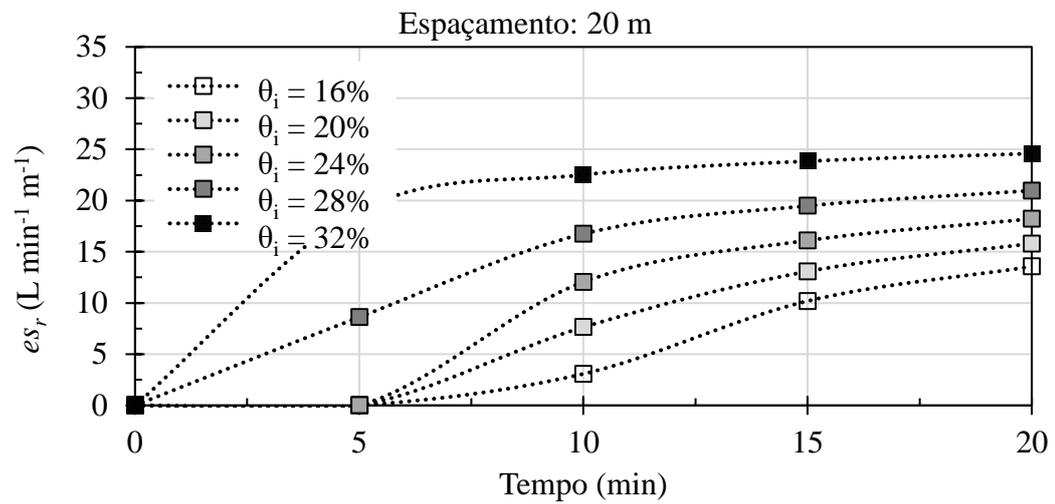
Figura 32 – Taxa de escoamento superficial por 1 m de sulco (es_r) com condições de conteúdo de água inicial de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. para a chuva de intensidade de 124 mm h^{-1} por 20 minutos para diferentes espaçamentos entre sulcos. a) 5 m; b) 10 m; c) 15 m; d) 20); e) 25 m.



c)



d)



e)

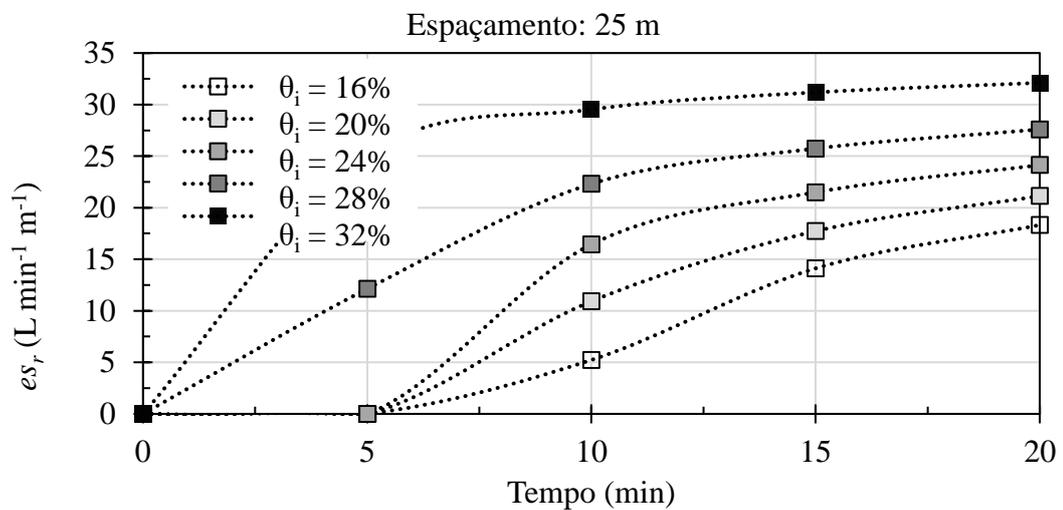
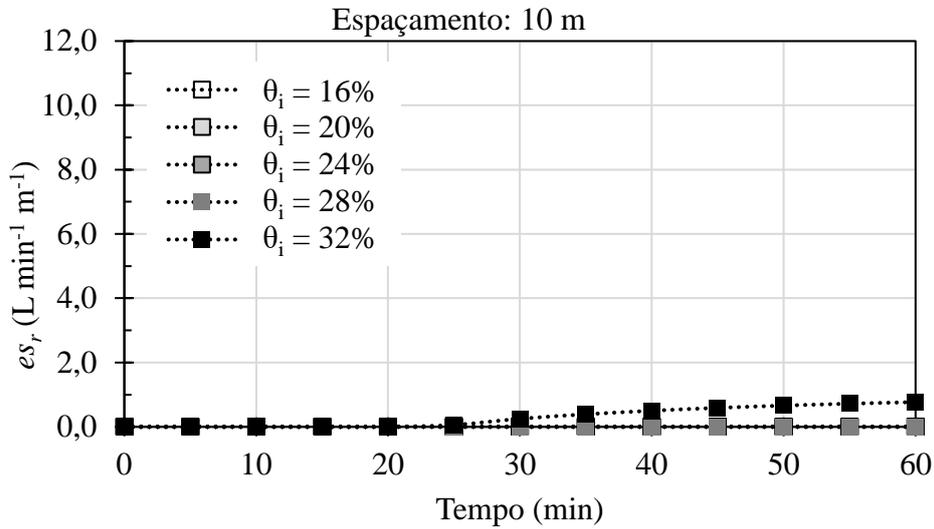
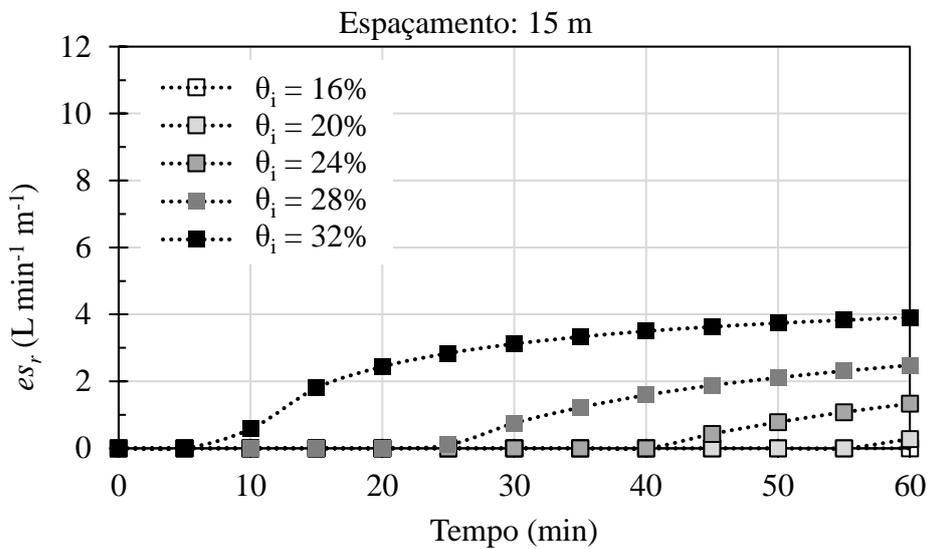


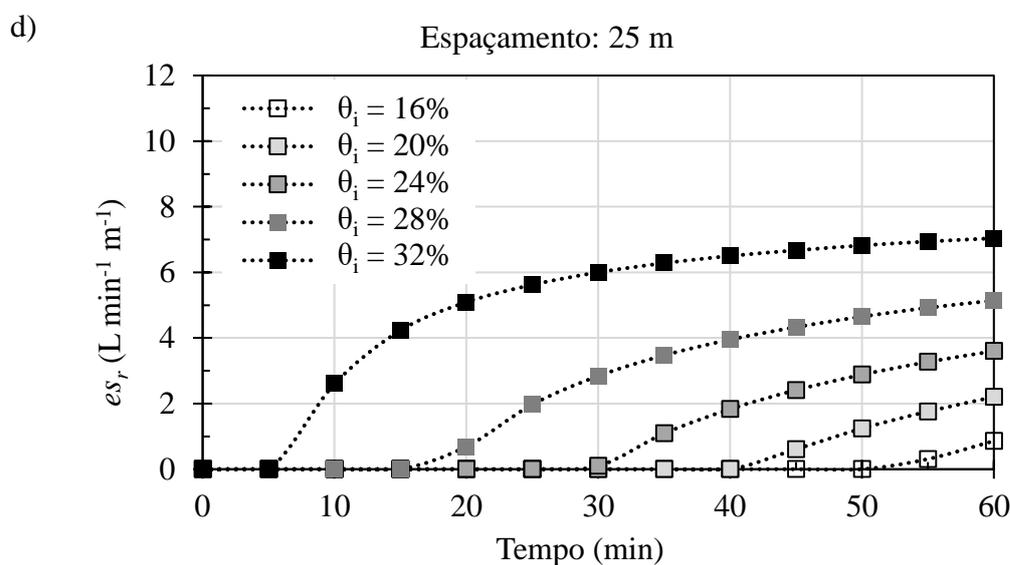
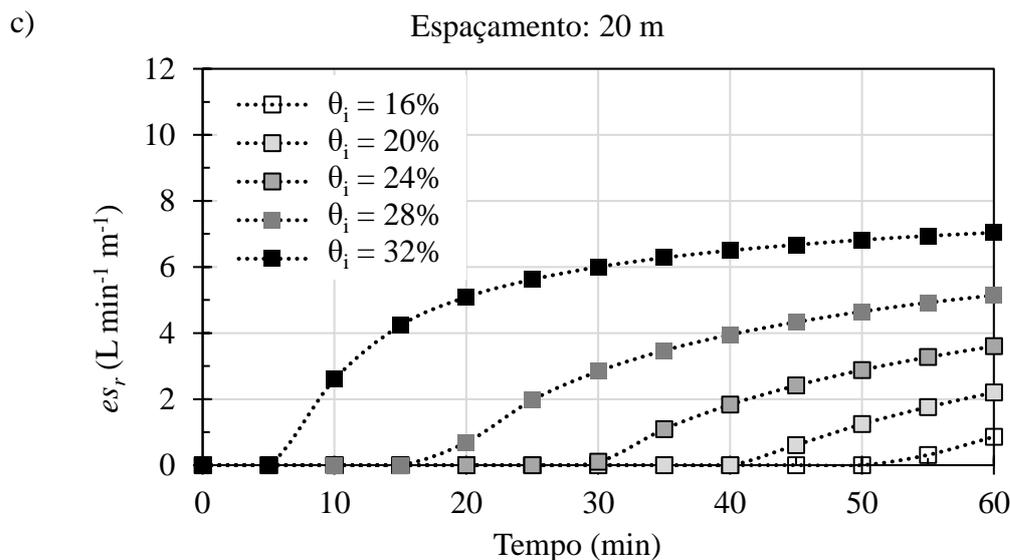
Figura 33 – Taxa de escoamento superficial por 1 m de sulco (es_r) com condições de conteúdo de água inicial de 16, 20, 24, 28 e 32%-vol. para a chuva de intensidade de $65,83 \text{ mm h}^{-1}$ por 60 minutos para diferentes espaçamentos entre sulcos. a) 10 m; b) 15 m; c) 20 m; d) 25 m. No espaçamento de 5 m não houve escoamento superficial.

a)



b)





Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

6.4.1 Calibração do modelo

A distribuição de água no solo por meio da infiltração pelo sulco do VM e pela superfície do solo foi simulada com o modelo bidimensional Infil2D, que está apresentado em detalhes no anexo A.

Na tabela 14 e figura 34 são apresentadas as análises estatísticas do ajuste do modelo com os parâmetros obtidos pela SWRC (tabela 5a). Embora os valores de *PBIAS* e do índice

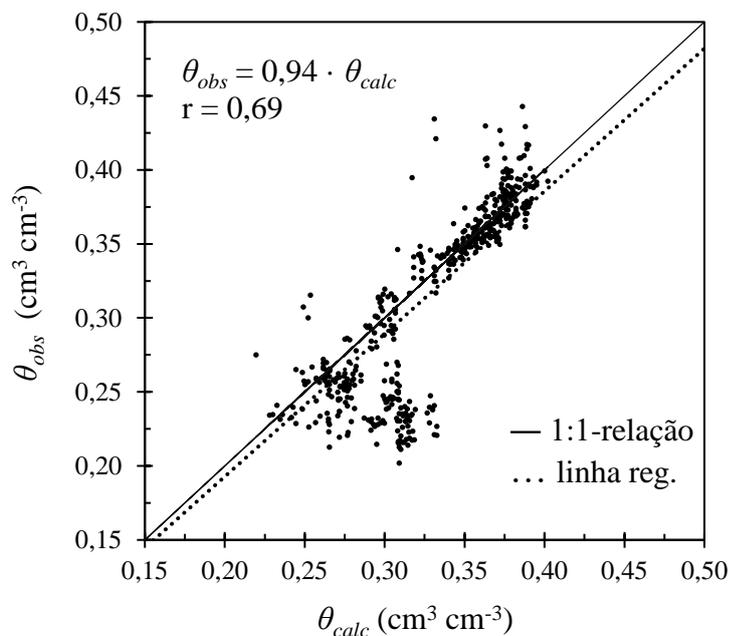
de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*) possam classificar como bom ajuste do modelo (segundo classificação apresentada na tabela 3), a análise de correlação mostra grande dispersão (figura 34) entre os dados observados e calculados. Os dados não estão uniformemente espalhados no entorno da linha 1:1, especificamente na parte inferior do gráfico. Conseqüentemente a inclinação da regressão difere bastante de 1, e o valor de *r* não é satisfatório. Isso indica que o modelo precisa de melhor ajuste nos parâmetros para representar os dados observados. Dessa forma foi realizado a calibração dos parâmetros *a*, *b* e *K_s* para cada uma das quatro camadas buscando o melhor ajuste do modelo.

Tabela 14 – Coeficientes de classificação do desempenho do modelo de distribuição de água no solo com uso dos parâmetros obtidos pela SWRC (tabela 5a).

<i>PBIAS</i> (%)	<i>NSE</i>
4,18	0,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (*r*) entre os dados de conteúdo de água no solo observados (θ_{obs}) e calculados (θ_{calc}) com uso dos parâmetros obtidos pela SWRC (tabela 5a).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 15 são apresentados os parâmetros para a , b e K_s obtidos pela calibração. Conforme mencionado anteriormente os valores absolutos de b , obtidos pela SWRC, são elevados com relação aos encontrados na literatura (por exemplo, Campbell, 1985) e o modelo apresenta elevada sensibilidade a esse parâmetro como apresentado no quadro 2a. Os dados obtidos na calibração estão mais de acordo com aqueles calculados de acordo com Campbell (1985) para cada uma das camadas do solo (ver tabela 5b). Os parâmetros para a obtidos na calibração são idênticos aos calculados em Campbell (1985). Na tabela 16 e figura 35 são apresentadas as análises estatísticas do processo de calibração. Os valores obtidos para $PBIAS$ e NSE segundo classificação apresentada na tabela 3 são considerados como muito bom ajuste e a análise de correlação indica menor dispersão dos dados em comparação aos parâmetros extraídos da SWRC. Adicionalmente, a declividade da regressão é mais próxima de 1 e o valor de r é satisfatório. Com essa análise é possível concluir que o modelo foi calibrado satisfatoriamente.

Tabela 15 – Parâmetros a , b e K_s calibrados.

	Camada (m)	a	b	K_s
1	0,00 - 0,18	0,4428	-2,56	25,00
2	0,18 - 0,72	0,1313	-2,99	10,92
3	0,72 - 0,90	0,1410	-1,78	10,54
4	0,90 - 1,98	0,0098	-3,59	4,14

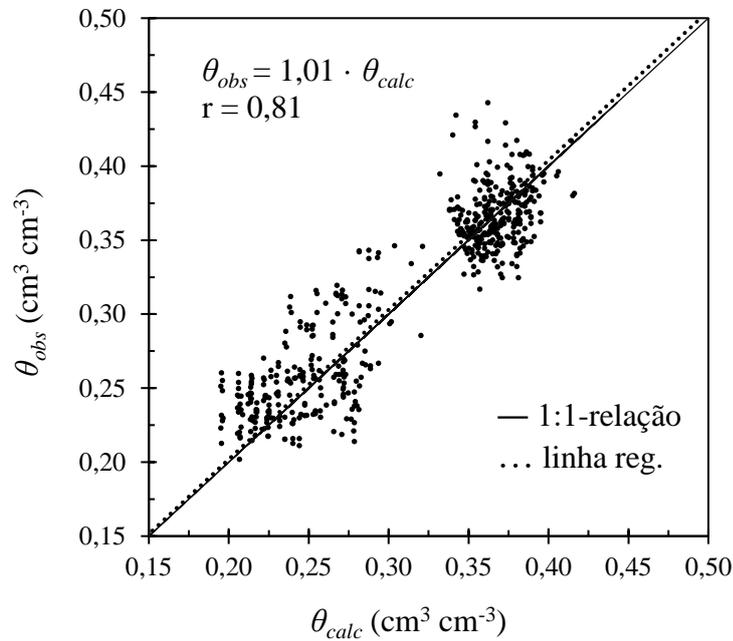
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Coeficientes de classificação do desempenho do modelo de distribuição de água no solo com uso dos parâmetros calibrados.

$PBIAS$ (%)	NSE
-1,59	0,81

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Análise de dispersão e correlação linear de Pearson (r) entre os dados de conteúdo de água no solo observados (θ_{obs}) e calculados (θ_{calc}) com uso dos parâmetros calibrados.

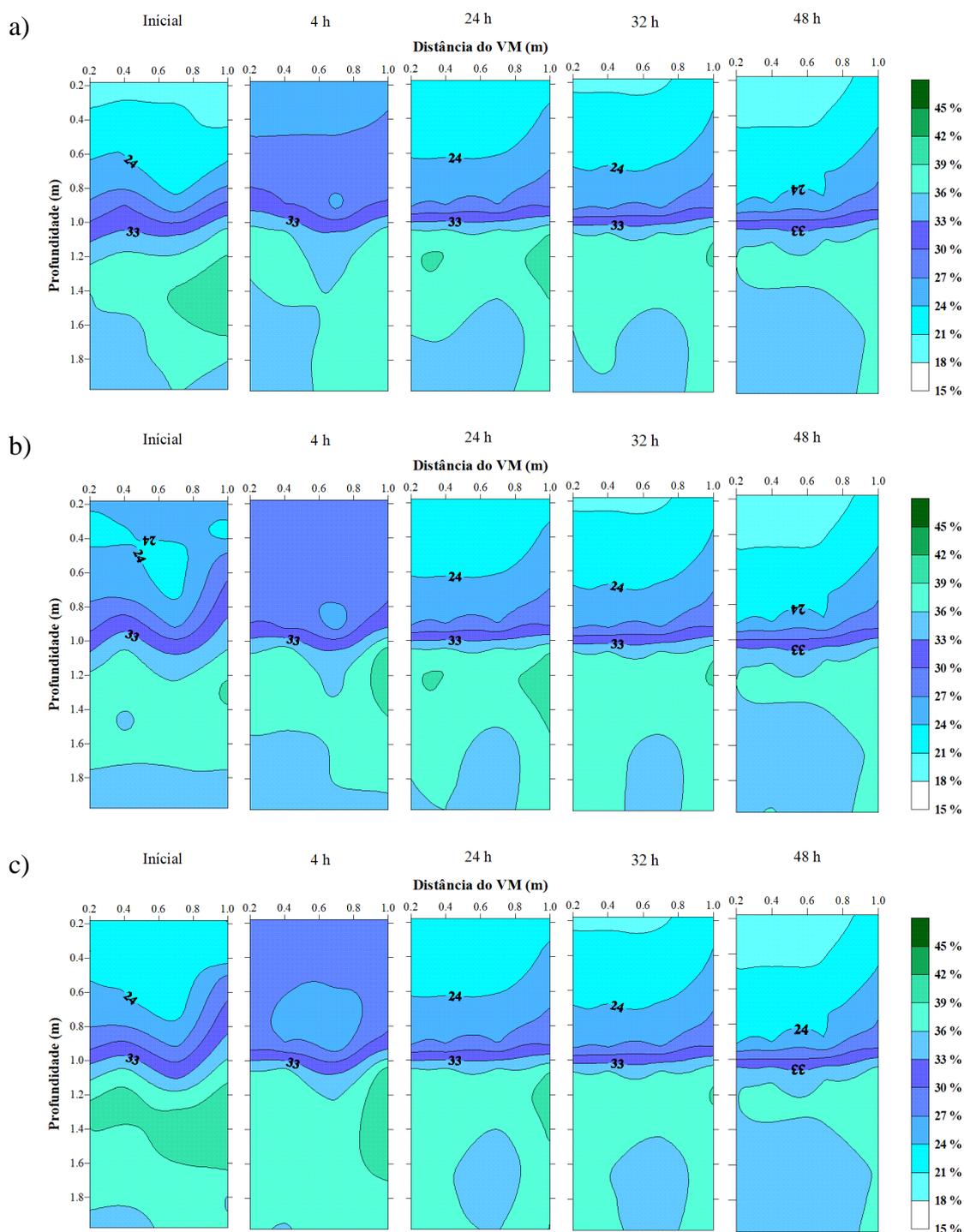


Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4.2 Simulações com os dados obtidos a campo

Após a calibração foi realizado a simulação do modelo utilizando as mesmas condições de conteúdo inicial de água no solo e de chuva medidas a campo em T_{com} em S1, S2 e S3. Na figura 36 são apresentados os resultados.

Figura 36 – Distribuição do conteúdo de água no solo (% de volume) para diferentes tempos calculados com o modelo Infil2D para as condições medidas a campo (Tabela 2). a) S1; b) S2; c) S3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados gerados pelo modelo reiteram o que já havia sido discutido na análise dos dados obtidos a campo. Não é possível verificar o efeito do VM no aumento do conteúdo

de água no solo após 24 horas do fim da precipitação. Após 4 horas é possível verificar que há aumento significativo no conteúdo inicial de água no solo entre as camadas de 0,2 a 0,6 metros de profundidade até 1,0 m de distância do VM, entretanto é necessário considerar que existe a infiltração oriunda da superfície do solo e não somente do sulco do VM. Para o tipo de solo pertencente ao presente estudo pode-se concluir que o VM não contribuiu para o aumento do conteúdo de água, após algumas horas do evento de precipitação, e sua maior disponibilidade para as plantas. Entretanto fica a pergunta. E para outros tipos de solo?

6.4.3 Distribuição de água em diferentes solos

Estimativa dos parâmetros a , b , θ_s e K_s

Como o modelo desenvolvido foi calibrado e é capaz de representar os dados observados, foi realizada também a análise do processo de infiltração de água no solo considerando dados de textura extraídos de Campbell (1985) para solos do tipo franco arenoso, franco argiloso e argiloso. Essas texturas dos solos foram definidas por serem as mais representativas das áreas de cultivo agrícola para o estado do Rio Grande do Sul.

Para realizar a análise por meio do modelo apresentado é preciso estimar valores dos parâmetros a e b da equação 6a, valores de porosidade total (θ_s) e condutividade hidráulica saturada (K_s). Esses parâmetros para os três tipos de solo analisados foram obtidos de Campbell (1985). Na tabela 17 são apresentados esses valores.

Tabela 17 – Parâmetros a , b , umidade saturada do solo (θ_s) e condutividade hidráulica saturada (K_s) segundo Campbell (1985).

Tipo de solo	a	b	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	K_s (mm h ⁻¹)
Franco arenoso	0,424	4,384	0,434	34,400
Franco argiloso	0,055	9,301	0,509	4,554
Argiloso	0,003	14,553	0,509	0,522

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dinâmica da infiltração em sulcos do VM

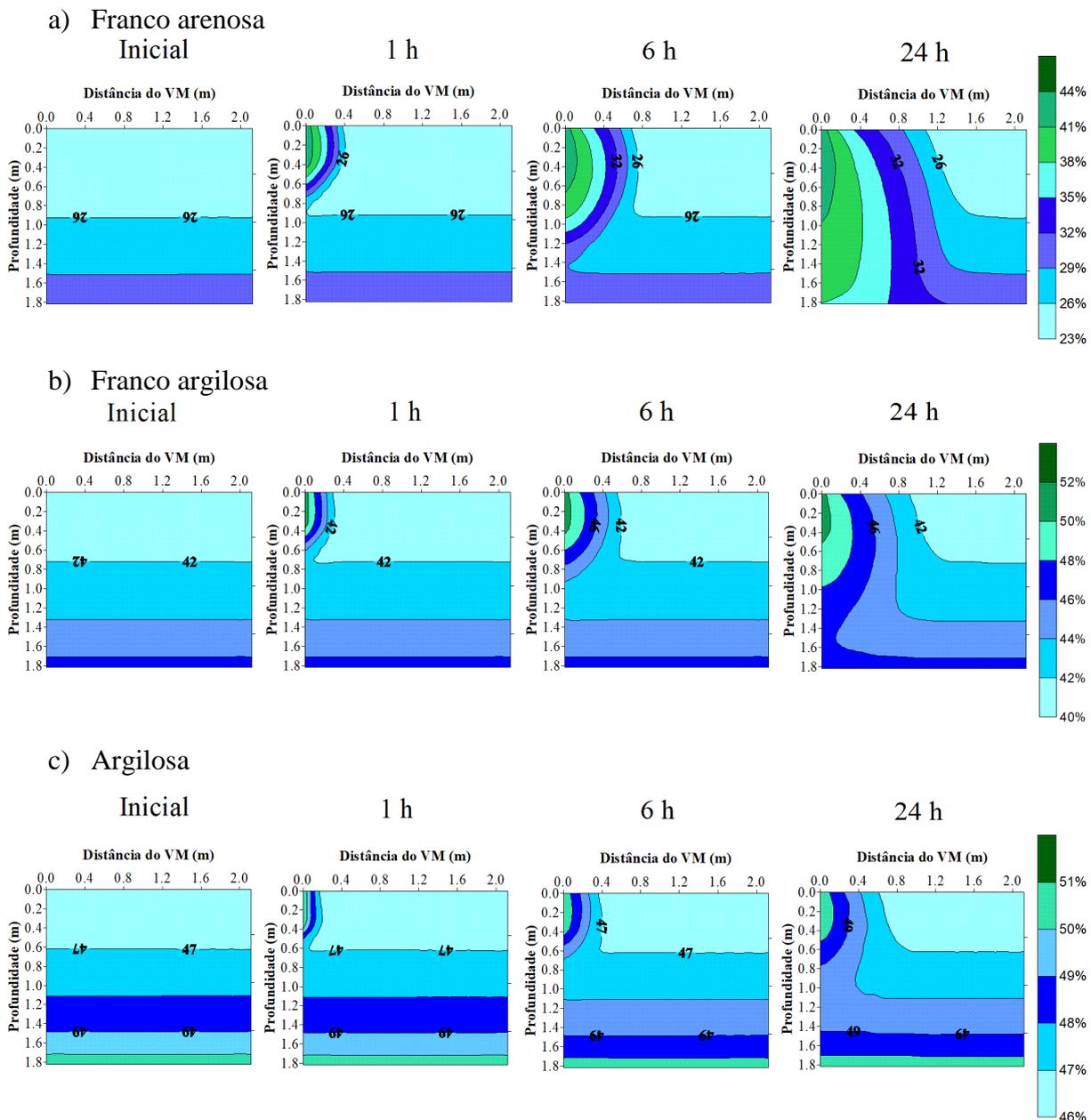
Primeiramente foi simulado o processo de infiltração de água no solo apenas pelo sulco do VM. Assim pode-se visualizar a dinâmica de distribuição de água no solo por meio

do VM para as três texturas do solo, sem a interferência da infiltração proveniente da superfície do solo. Isso é importante para estudar o deslocamento da frente de molhamento propagada pela infiltração no VM no perfil de solo. Na figura 37 são ilustrados os resultados para os solos franco arenoso, franco argiloso e argiloso. Nessas figuras são apresentados o conteúdo inicial de água no solo e para os tempos de 1, 6 e 24 h de infiltração contínua. No apêndice F são apresentados esses resultados na forma de matriz (como são gerados pelo modelo) para os tempos inicial e de 1, 6 e 24 h de infiltração.

Com essas simulações é possível observar que a água que infiltra pelo sulco no solo de textura franco arenosa se desloca até 0,40; 0,80 e 1,20 metros de distância do VM (sentido horizontal) após 1, 6 e 24 horas de infiltração no sulco, respectivamente. Para a textura franco argilosa o deslocamento foi de 0,30; 0,60 e 1,10 metros respectivamente para os tempos de 1, 6 e 24 horas de infiltração. Já para o solo de textura argilosa o deslocamento de água foi de 0,20; 0,40 e 0,70 metros de distância do VM, após respectivamente os mesmos tempos de infiltração já mencionados.

Anteriormente foi analisado que os melhores espaçamentos entre sulcos para diminuição do escoamento superficial ocasionado por chuvas intensas são os espaçamentos de 5 e 10 metros. Como a água que infiltra pelo sulco não se desloca mais que 1,20 metros em um solo franco arenoso após 24 horas de infiltração, pode-se afirmar que o VM não contribui significativamente para o aumento do conteúdo de água no solo na faixa entre sulcos.

Figura 37 – Conteúdo de água no solo (% de volume) inicial e após 1, 6 e 24 horas de infiltração contínua no sulco calculado com o modelo Infil2D para o solo de textura: a) franco arenosa, b) franco argilosa e c) argilosa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cote et al. (2003) observaram que a forma do bulbo molhado (nome dado a área do solo molhada) foi mais alongada em solos arenosos e com formato esférico em solos de textura fina, devido a maior influência das forças de retenção sobre a força da gravidade. Esse processo pode ser visualizado nos resultados da figura 37. Thorburn et al. (2003) verificaram

que o bulbo molhado formado em 5 solos de textura semelhantes teve grande variação, explicada pela diferença na estrutura destes solos.

Nesse estudo foi abordada a hipótese, de que em caso o VM aumentasse o conteúdo de água no solo na região das raízes das plantas, a sucção do solo diminuiria, tornando a água remanescente mais disponível para a absorção pelas raízes das plantas. No entanto, os resultados demonstram que a frente de molhamento gerada pela infiltração no sulco do VM se propaga apenas a curta distância do sulco (sentido horizontal), não sendo um benefício significativo.

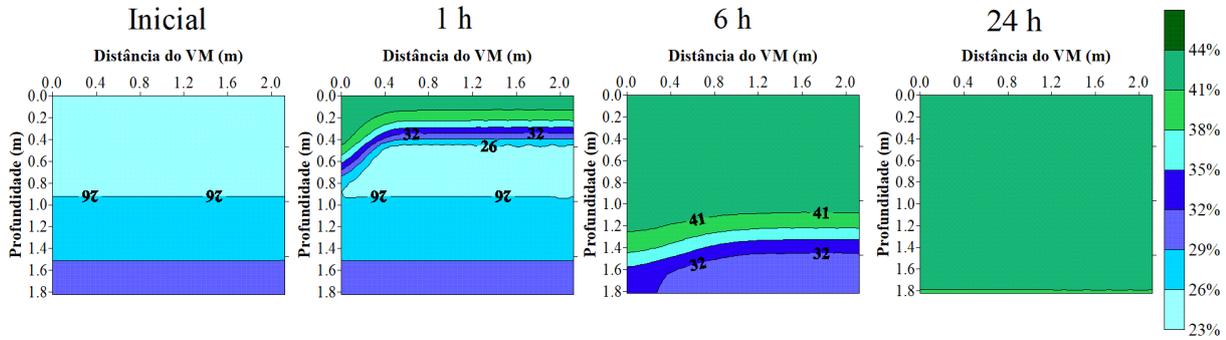
Dinâmica da infiltração na superfície do solo e no sulco do VM.

Após a análise do processo de infiltração apenas pelo sulco foi realizada a análise da distribuição de água no solo pela infiltração no sulco mais a infiltração da superfície do solo (condição natural). Na figura 38 é ilustrado esse resultado para os solos franco arenoso, franco argiloso e argiloso. Nessa figura é apresentado o conteúdo inicial de água no solo para os tempos de 1, 6 e 24 h de infiltração contínua.

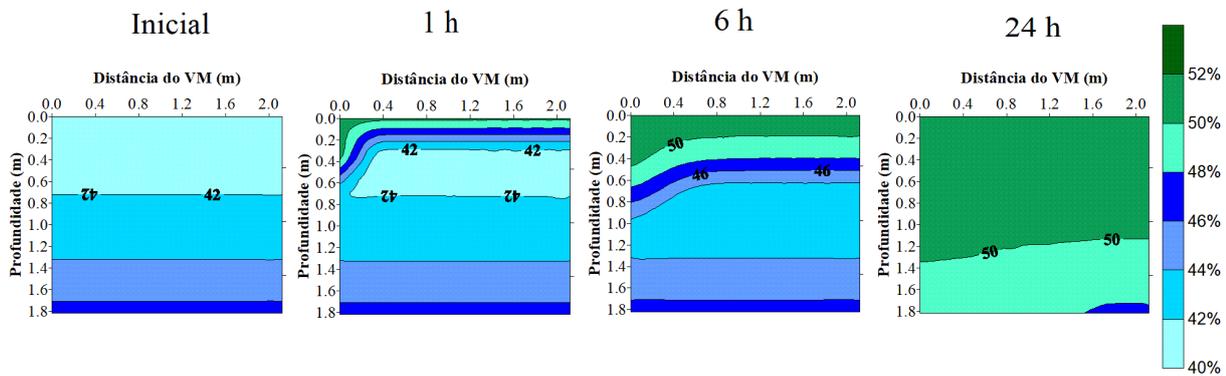
Para o solo de textura franco arenosa é possível observar o efeito da infiltração pelo sulco apenas no tempo de 1 hora. Para os demais tempos não é possível visualizar mais esse efeito. Para o solo de textura franco argilosa é possível observar o efeito da infiltração pelo sulco para os tempos de 1 e 6 horas. Para o solo de textura argilosa é possível observar o efeito da infiltração pelo sulco até certo ponto (aproximadamente 0,8 m de distância do sulco) mesmo após 24 horas. Assim a infiltração que ocorre na superfície do solo é mais lenta, e o efeito da infiltração que ocorre no sulco na profundidade de 0,40 m perdura por mais tempo para os solos franco argilosos e argilosos.

Figura 38 – Conteúdo de água no solo (% de volume) inicial e após 1, 6 e 24 horas de infiltração contínua no sulco e na superfície do solo calculado com o modelo Infil2D para o solo de textura: a) franco arenosa, b) franco argilosa e c) argilosa.

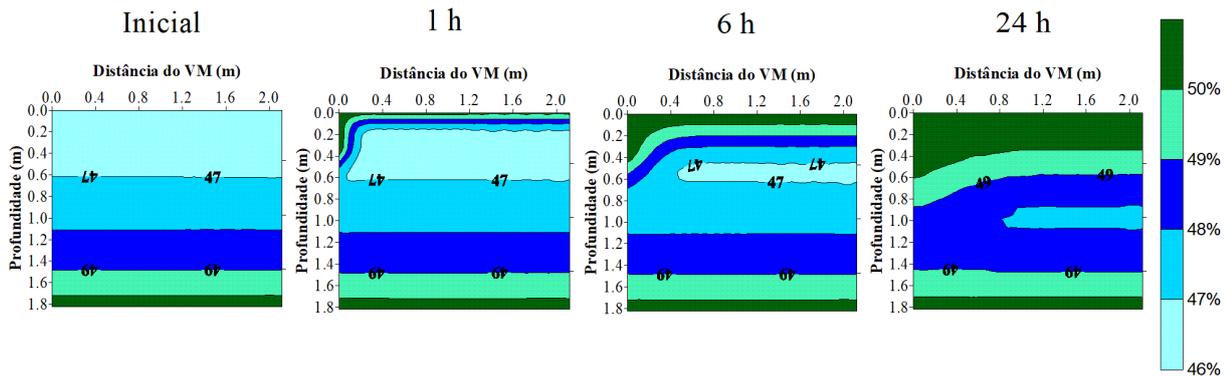
a) Franco arenosa



b) Franco argilosa



c) Argilosa



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES

Os resultados dos experimentos de campo, associados às simulações utilizando o modelo de Green e Ampt (1911) modificado por Mein e Larson (1973) para simular o escoamento superficial, e ao modelo Infil2D para simular a distribuição de água no perfil do solo, permitem concluir que:

1 – A eficiência do vertical mulching na detenção do escoamento superficial aumenta à medida que o espaçamento entre sulcos diminui. Embora o VM não evite por completo a propagação do escoamento superficial (principalmente para condições de elevado conteúdo inicial de água no solo) gerado por chuvas intensas, com tempo de retorno de 20 anos e durações de 20, 60 e 120 minutos, conclui-se que as perdas de água são reduzidas consideravelmente em todos os espaçamentos testados (5, 10, 15, 20 e 25 m). Sendo mais eficiente para menores espaçamentos entre sulcos.

2 – Quanto a distribuição de água no perfil do solo por meio do sulco do VM a análise dos resultados a campo mostra que o aumento do conteúdo de água desaparece poucas horas após o fim da chuva simulada, pois o processo de drenagem da água para camadas mais profundas do que as camadas monitoradas ocorre rapidamente. Além disso, o efeito da infiltração pelo sulco é sobreposto pela infiltração da superfície do solo. Após 24 horas da simulação de chuva a campo para a maioria das repetições não foi visualizado o efeito no solo da infiltração pelo sulco.

3 – Com uso do modelo Infil2D foi possível verificar a condição em que ocorre infiltração apenas no sulco do VM. Nesse caso conclui-se que para o solo de textura franco arenosa a distribuição de água, após 24 horas de infiltração, se propaga no interior do solo a até 1,20 metros de distância do VM (no sentido horizontal). Para os solos de textura franco argilosa e argilosa essa distância de propagação para o mesmo tempo de 24 horas de infiltração foi de 0,90 e 0,50 metros respectivamente. Isso significa que o vertical mulching não aumenta o volume de água no solo disponível para as plantas. Todavia aumentando a quantidade de água que infiltra a técnica contribui para a recarga de águas subterrâneas.

Por fim é possível fazer as seguintes considerações sobre os modelos utilizados neste estudo:

1 – Na modelagem do escoamento superficial foi apresentado um método de cálculo para avaliar o efeito do espaçamento entre sulcos, conteúdo inicial de água no solo, intensidade e duração da chuva no escoamento superficial. Esse modelo também pode ser

utilizado para encontrar o espaçamento necessário entre sulcos, a fim de evitar completamente o escoamento superficial em encostas para determinada chuva desejada (chuva de projeto).

2 – O modelo Infil2D simulou satisfatoriamente os dados determinados a campo, mostrando-se uma ferramenta adequada no estudo do processo de movimento de água no perfil do solo.

REFERÊNCIAS

- ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil and Tillage Research**, v. 115, p. 1-15, 2011.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A.; HIPÓLITO, J. L.; CASTILHO, S. R. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, v. 30, n. 1, p. 167-180, 2005.
- BARROSO, D. G.; SILVA, M. L. N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe agropecuário**, v.176, n.16, p. 17-24, 1992.
- BERNARDI, R. P. Impacto do uso do solo agrícola na infiltração de água. 2011. 23 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Universitário Franciscano, Santa Maria, RS, 2011.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**, 8ª ed. Viçosa: UFV, 625 p. 2008.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 355 p. 2012.
- BEVEN, K. J.; KIRBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin Hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v. 24, n.1, p. 43-69, 1979.
- BLACKWELL, P. S.; RINGROSE-VOASE, A. J.; JAYAWARDANE, N. S.; OLSSON, K. A.; MCKENZIE, D. C.; MASON, W. K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, v. 41, n. 2, p. 215-228, 1990.
- BOARDMAN, J.; POESEN, J. **Soil erosion in europe**. Chichester: Wiley, 878 p. 2006.
- BRAKENSIEK, D. L.; OSBORN, H. B.; RAWLS, W. J. **Field manual for research in agricultural hydrology**. Agriculture Handbook No. 224, U.S. Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C., EUA, 550 p. 1979.
- BRANCO, N.; PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí Mirim – Avaliação preliminar**. In: XVII. CONGRESSO NACIONAL DEL ÁGUA, II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DEL CONOSUR, Santa Fé: BRH Digital, v. 3, p. 444-451, 1998.
- BRIGGS, L. J. **The mechanics of soil moisture**. USDA Bureau of Soils Bull 10, US Government Printing Office, Washington, D.C., EUA, 1897. Disponível em: <<https://archive.org/details/mechanicsofsoilm10brig>> Acessado em: 22 fev. 2016.
- BUCKINGHAM, E. **Studies of the movement of soil moisture**, USDA Bureau of Soils Bull 38, US Government Printing Office, Washington, D.C., 1907. Disponível em:< <https://archive.org/details/studiesonmovemen38buck>> Acessado em: 04 fev 2016.

CAMPBELL, G. S. **Soil physics with BASIC**, 150 pp. 1985..

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. D. Spatial variability of MO, P, K and CTC of soil under different use and management conditions. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, p. 394-400, 2007.

CHAVES, H. M. L.; ORLOWSKI, E.; ROLOFF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 17, p. 141-147, 1993.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley, University of California Agricultural Experiment Station, 124 p., 1942.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. Tese de Doutorado. (Doutorado em Ciência do Solo) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 106 p., 2005.

CONLEY, D. J. Biogeochemical nutrient cycles and nutrient management strategies. **Hydrobiologia**, v. 410, p. 87-96, 2000.

COOPLANTIO - Cooperativa dos Agricultores de Plantio Direto. **Plantio direto - Reduzir custos de produção, melhorar a produtividade e preservar os recursos naturais**. 2012. Disponível em: <<http://www1.cooplantio.com.br/quem-somos/a-cooplantio.aspx>>. Acesso: 21 de dezembro de 2012.

COTE, C. M.; BRISTOW, K. L.; CHARLESWORTH, P. B.; COOK, F. J.; THORBURN, P. J. Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 22, n.3, p. 143-156, 2003.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C. & FONTES, L. E. F. Vocabulário da ciência do solo. Campinas. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 90 p. 1993.

DALLA COSTA, D. R. **Nutrientes na água de escoamento superficial em plantio direto com mulching vertical**. 2004. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A.; MANHAGO, D. D. Vertical mulching” como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2847-2852, 2008.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A. Dia Nacional da Conservação do Solo: A agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 10-15, 2011.

DIAMOND, J. **Collapse: How societies choose to fail or survive**. London: Penguin, 575 p., 1997.

DÍAZ, F. J.; ANTHONY, T. O.; DAHLGREN, R. A. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 171-183, 2012.

- DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; REICHERT, J. M.; MERTEN, G. H.; DALBIANCO, L.; DE BARRROS, C. A. P.; RAMON, R. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1287-1297, 2014.
- DIONISIO, H. A. F. Erosão hídrica: susceptibilidade do solo. **Revista Eletrônica Thesis**, v. 1, p. 15-25, 2010.
- DRESCHER, M. S.; FOLETTTO ELTZ, F. L.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, 2011.
- DRESCHER, M. S. **Estratégias para descompactação do solo por escarificação e hastes sulcadoras em sistema Plantio Direto**. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciencia do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 119 p., 2015.
- EHLERS, W.; GOSS, M. **Water dynamics in plant production**. Oxford: CABI, 273 p. 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p., 1997.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA – FEBRAPDP, 2014. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em <http://www.febrapdp.org.br/download/Ev_area_pd_brasil.pdf>. Acesso em dezembro de 2014.
- FONTENELE, W. **Indicadores físicos e hídricos da qualidade de um latossolo amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado do Piauí**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Piauí, Teresina, 52 p., 2006.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. New York: Wiley, 2012.
- GARCIA, S. M.; RIGHES, A. A. Vertical mulching e manejo da água em Semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 833-842, 2008.
- GARDNER, W. The capillary potential and its relation to soil moisture constants. **Soil science**, v. 10, n. 5, p. 357-360, 1920. Disponível em: <http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1920/11000/THE_CAPILLARY_POTENTIAL_AND_ITS_RELATION_TO.3.aspx> Acesso em março de 2015.
- GARDNER, W. R.; HILLEL, D.; BENYAMINI, Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. Redistribution. **Water Resources Research**, v. 6, n. 3, p. 851-861, 1970.
- GILLEY, J. E.; RISSE, L. M. Runoff and soil loss as affected by the application of manure. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 6, p. 1583, 2000.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on Soil Phycs. I. The flow of air and water through soils. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

- GREGORY, A. S.; BIRD, N. R.; WHALLEY, W. R.; MATTHEWS, G. P.; YOUNG, I. M. Deformation and shrinkage effects on the soil water release characteristic. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 4, p. 1104-1112, 2010.
- GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. D. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Erosão e Conservação de Solos no Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.
- HESSEL, R.; TENGE, A. A pragmatic approach to modelling soil and water conservation measures with a catchment scale erosion model. **Catena**, v. 74, n. 2, p. 119-126, 2008.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998, 771 p.
- HORTON, R. E. Erosion development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, p. 275-370, 1945.
- HUDSON, N. **Soil conservation**. New York: Cornell University Press, 1977, 315 p.
- IVERSEN, B. V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; JACOBSEN, O. H. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 4, p. 618-626, 2003.
- KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984.
- KOTULLA, A. **Wassergehaltsänderungen in einem Lysimetergefäß: Vergleich von Messungen mit einer Waage und lückenlosem Abtasten mit einer Bodenfeuchtesonde**. Teil 1: Test der Bodenfeuchtesonde TRIME-PICO IPH T3/44 der Firma IMKO. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais III). Universidade de Martin Luther Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Alemanha, 56 p., 2013.
- KUNCORO, P. H.; KOGA, K.; SATTI, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 172-179, 2014.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, n. 1, p. 107-136, 2003.
- MAETENS, W.; POESEN, J.; VANMAERCKE, M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? **Earth-Science Reviews**, v. 115, n. 1, p. 21-36, 2012.
- MAGALHÃES, G. M. F. Análise da eficiência de terraços de retenção em sub-bacias hidrográficas do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1109-1115, 2013.
- MATTHEWS, G. P.; LAUDONE, G. M.; GREGORY, A. S.; BIRD, N. R. A.; MATTHEWS, A. G.; WHALLEY, W. R. Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil. **Water Resources Research**, v. 46, n. 5, p. 283-290, 2010.

- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v. 9, n. 2, p. 384-394, 1973.
- MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**, v. 263, p. 47-59, 2016.
- MONTGOMERY, D. R. **Dirt: The erosion of civilizations**, Berkeley: University of California Press, 2007.
- MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. Oxford: Wiley-Blackwell. 2005.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MULLER, A.C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995, 412 p.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552p
- NISHIJIMA, T.; RIGHES, A. A. Escoamento superficial de água em cinco sistemas de manejo do solo com cultura do milho. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v. 17, n. 3, 1987.
- OWENS, P. N.; BATALLA, R. J.; COLLINS, A. J.; GOMEZ, B.; HICKS, D. M.; HOROWITZ, A. J.; KONDOLF, G. M.; MARDEN, M.; PAGE, M. J.; PETTICREW, E. L.; SALOMONS, W.; TRUSTRUM, N. A. Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. **River Research and Applications**, v. 21, n. 7, p. 693-717, 2005.
- PHAM, H. Q.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 42, n. 6, p. 1548-1568, 2005.
- PHILIP, J. R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, v. 14, n. 4, p. 354-366, 1957.
- RAMON, C. A. **Controle da drenagem na fonte e sua compatibilização ao plano municipal de saneamento ambiental de Santa Maria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 151 p., 2015.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **Transactions of the ASAE**, v. 25, n. 5, p. 1316-1320, 1982.
- REDINGER, G. J.; CAMPBELL, G. S.; SAXTON, K. E.; PAPENDICK, R. I. Infiltration rate into slot mulches: Measurement and numerical simulation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 5, p. 982-986, 1984.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v. 5, p. 49-134.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, 2009.

RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed): **Methods of soil Analysis**. Part 1, Physical and Mineralogical Properties. American Society of Agronomy, Monograph No. 9, Madison, Wisconsin, EUA, 1965, p. 128-152.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Géotechnique**, v. 43, n. 2, p. 321-4, 1993.

RIGHES, A. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; NISHIJIMA, T.; GARCIA, S. M. “Mulching” vertical e escoamento superficial no sistema plantio direto. In: XXXI. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. **A engenharia agrícola para o desenvolvimento sustentável: Água, energia e meio ambiente**. Salvador: SBEA/UFBA/Embrapa, 2002, p. 225-236.

ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBUCKLE, B. K.; JONES, R.; KNIGHT, F.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358-389, 2008.

ROBINSON, D. A.; ABDU, H.; LEBRON, I.; JONES, S. B. Imaging of hillslope soil moisture wetting patterns in a semi-arid oak savanna catchment using time-lapse electromagnetic induction. **Journal of Hydrology**, v. 416, p. 39-49, 2012.

SATTARI, S. A.; TOKER, M. K. Obtaining soil–water characteristic curves by numerical modeling of drainage in particulate media. **Computers and Geotechnics**, v.74, p.196-210, 2016.

SCHJØNNING, P.; IVERSEN, B. V.; MUNKHOLRN, L. J.; LABOURIAU, R.; JACOBSEN, O. H. Pore characteristics and hydraulic properties of a sandy loam supplied for a century with either animal manure or mineral fertilizers. **Soil Use and Management**, v. 21, n. 3, p. 265-275, 2005.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES DA SILVA, V. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 58-64, 2009.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; L. DAVIN, E.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. Investigating soil moisture – climate interactions in a changing climate: A review. **Earth Science Reviews**, v. 99, n. 3, p. 125-161, 2010.

- SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, v. 61, n. 3, p. 143-155, 2001.
- SILVA, L. C.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.
- SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. D. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 973-983, 2003.
- SINGH, D. N.; KURIYA, N., SNEHA J. Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils using a geotechnical centrifuge. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39, n. 3, p. 684-694, 2002.
- SMETS, T.; POESEN, J.; BOCHET, E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 6, p. 654-677, 2008.
- SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; SOUZA, L. C. D.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. D. 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.
- SU, S. L.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92-105, 2014.
- TERHOEVEN-URSELMANS, T.; SCHMIDT, H.; JOERGENSEN, R. G.; LUDWIG, B. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 5, p. 1178-1188, 2008.
- THORBURN, P. J.; COOK, F. J.; BRISTOW, K. L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. **Irrigation Science**, v. 22, p. 121-127, 2003.
- TIECHER, T.; MINELLA, J.P.G. Erosão do solo: um problema mundial agravando-se num contexto de “agricultura conservacionista” no Sul do Brasil. In: TIECHER, T. (org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: contextualizando as atividades agropecuárias e os problemas erosivos**, URI – Frederico Westphalen, v.1, 157 p., 2015.
- TÖPFER, F. **Validity of soil moisture measurements with lysimeters and TDR-probes for larger areas in light of the spatial variability of soil moisture**. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais III). Universidade de Martin Luther Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Alemanha, 59 p., 2016.
- VANMAERCKE, M.; POESEN, J.; VENTE, J.; VERSTRAETEN, G. Sediment yield as a desertification risk indicator. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 9, p. 1715-1725, 2011.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, p. 75-94, 1946.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v. 32, p. 181-193, 1931.

WIDTSOE, J. A.; MCLAUGHLIN, W. W. The movement of water in irrigated soils. **Utah Agricultural College Experiment Station**, 1912. Disponível em: <
<http://catalog.hathitrust.org/Record/100596762>> Acessado em 05 mar. 2015

WÓJCIGA, A.; BOLTE, K.; HORN, R.; STÊPNIEWSKI, W.; BAJUK, E. Surface shear resistance of soils on the micro- to mesoscale. **International Agrophysics**, v. 23, p. 391-398, 2009.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H. Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve. **Engineering Geology**, v. 199, p. 148-156, 2015.

Apêndice A

Modelo GA-ML escrito em linguagem QB64.

```

1  'Calculo da infiltracao de agua no solo pelo modelo de Green e Ampt (1911) modificado
2  por Mein e Larson (1973)
3
4  CLS
5
6  FLAG = 1
7  IF FLAG = 0 THEN GOTO 10
8  F$ = "C:\local de destino do arquivo\nome do arquivo.txt"
9  OPEN F$ FOR OUTPUT AS #1
10
11  '----- Dados de Entrada -----
12
13  10 Ks = 24.1   'mm/h
14     Tau = 311   'mm
15     Wi = .32   'fracao
16     Ws = .34   'fracao
17
18     isul = 330   'l/h/m
19     P = 66   'mm/h
20     tm = 60   'min duracao da chuva
21
22     dt = 1   'min
23
24     t0 = dt   'min
25     t1 = t0 + dt   'min
26
27     pp = P / 60   'conversao para mm/min
28     Kss = Ks / 60   'conversao para mm/min
29
30     x = 5   'm Espacamento entre sulcos
31
32     SESR = 0
33
34  '----- Calculo da infiltracao inicial -----
35
36     I = pp * dt   'mm
37     iv = Kss * (Tau * (Ws - Wi) / I + 1)   'mm/min
38     IF iv >= pp THEN iv = pp
39
40     ES = pp - iv   'mm/min = l/sqm/min
41     SP = pp * t0   'mm
42     SES = SP - I   'mm
43
44     ESTcom = (x * ES) - (isul / 60)   'l/min/m
45     IF ESTcom < 0 THEN ESTcom = 0
46
47     PRINT " t i ES ESTcom SP I SES"

```

```

48 PRINT " (min) (l/min) (l/min) (l/min/m) (l) (l) (l/sqm)"
49 PRINT USING " ### ##.## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.##"; t0,
50 iv * x, ES * x, ESTcom, SP * x, I * x, SES
51
52 IF FLAG = 1 THEN PRINT #1, " t i ES ESTcom SP I
53 SES"
54 IF FLAG = 1 THEN PRINT #1, " (min) (l/min) (l/min) (l/min/m) (l) (l)
55 (l/sqm)"
56 IF FLAG = 1 THEN PRINT #1, USING " ### ##.## ##.## ##.## ##.##
57 ##.## ##.##"; t0, iv * x, ES * x, ESTcom, SP * x, I * x, SES
58
59 '----- Calculo da infiltracao para os demais tempos -----
60 cc = 1
61
62 FOR t = t1 TO tm STEP dt
63 cc = cc + 1
64
65 dI = iv * dt
66 IF dI >= pp THEN dI = pp
67 I = I + dI
68
69 ES = pp - iv
70 SP = pp * t
71 SES = SP - I
72
73 ESTcom = (x * ES) - isul / 60
74 IF ESTcom < 0 THEN ESTcom = 0
75
76 SESR = SESR + ESTcom * dt
77
78 IF cc < 4.01 THEN GOTO 123
79 PRINT USING " ### ##.## ##.## ##.## ##.## ##.## ##.##
80 ##.##"; t, iv * x, ES * x, ESTcom, SP * x, I * x, SES
81 IF FLAG = 1 THEN PRINT #1, USING " ### ##.## ##.## ##.## ##.##
82 ##.## ##.##"; t, iv * x, ES * x, ESTcom, SP * x, I * x, SES
83 'sleep
84 cc = 0
85
86 123 'SLEEP
87
88 in = Kss * (Tau * (Ws - Wi) / I + 1)
89 IF in >= pp THEN in = pp
90 iv = in
91 c = 0
92 t0 = INT(tr + 1)
93
94

```

```
95 NEXT t
96
97 '-----Tempo do inicio do ES-----
98
99  $tr = \text{Tau} * (Ws - Wi) / (pp * (pp / Kss - 1))$ 
100  $Itr = pp * tr$ 
101
102 PRINT "Tempo do inicio do escoamento (min)  Volume ES (mm)"
103 PRINT USING "      ##.##          ###"; tr, Itr
104
105 '-----
106
107 END
```

Apêndice B

Relação entre conteúdo inicial de água no solo e tensão matricial calculada com parâmetros da SWRC e por Campbell (1985).

a) S1

b) S2

c) S3

a) S1

Camada (m)		Tempo: Inicial											
		Conteúdo de água no solo (% vol.)				Tensão matricial (kPa) - SWRC				Tensão matricial (kPa) – Campbell (1985)			
		0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m
0,00 – 0,18	1	18,51	19,01	18,40	18,51	25,31	22,10	26,13	25,36	32,67	29,45	33,48	32,72
0,18 – 0,36	2	21,42	22,54	22,18	19,56	113,27	69,05	80,54	273,94	21,04	16,49	17,79	32,47
0,36 – 0,54	3	23,45	23,85	21,45	22,77	46,89	39,72	111,65	62,46	13,63	12,57	20,89	15,70
0,36 – 0,72	4	24,55	24,87	21,96	25,24	30,03	26,42	89,08	22,89	10,95	10,28	18,69	9,58
0,72 – 0,90	5	27,48	30,13	24,89	30,86	84,10	24,35	318,57	17,64	18,47	11,07	32,01	9,69
0,90 – 1,08	6	32,12	33,83	33,23	37,91	389,33	131,82	191,18	12,15	163,77	94,66	114,25	28,31
1,08 – 1,26	7	36,22	37,92	37,18	39,68	31,51	12,08	18,27	4,68	45,87	28,24	34,81	17,47
1,26 – 1,44	8	35,83	38,06	39,52	40,73	39,52	11,19	5,10	2,71	51,44	27,16	18,25	13,25
1,44 – 1,62	9	35,74	33,91	38,16	39,93	41,66	125,34	10,59	4,11	52,83	92,27	26,41	16,36
1,62 – 1,80	10	34,85	35,89	36,56	36,08	70,67	38,27	26,01	34,29	69,04	50,61	41,62	47,87
1,80 – 1,98	11	33,99	33,91	36,14	35,00	119,68	125,60	33,12	64,66	90,14	92,36	47,04	66,00

b) S2

Camada (m)		Tempo: Inicial											
		Conteúdo de água no solo (% vol.)				Tensão matricial (kPa) - SWRC				Tensão matricial (kPa) – Campbell (1985)			
		0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m
0,00 – 0,18	1	24,65	25,44	26,23	26,25	5,83	4,95	4,24	4,22	10,66	9,40	8,35	8,33
0,18 – 0,36	2	22,61	23,82	24,60	22,64	66,93	40,33	29,46	66,02	16,24	12,66	10,85	16,13
0,36 – 0,54	3	25,56	24,73	23,06	29,15	20,26	27,92	55,20	5,64	9,03	10,57	14,77	4,81
0,36 – 0,72	4	26,30	26,25	23,26	31,02	15,33	15,61	50,77	3,07	7,87	7,94	14,18	3,57
0,72 – 0,90	5	28,74	32,10	26,07	33,78	45,98	10,38	170,81	5,22	14,40	7,79	24,75	5,87
0,90 – 1,08	6	33,26	37,01	33,06	36,58	187,90	20,10	212,94	25,69	113,26	36,53	120,66	41,37
1,08 – 1,26	7	37,63	38,21	36,26	39,49	14,19	10,30	30,79	5,17	30,63	26,05	45,34	18,38
1,26 – 1,44	8	37,39	35,38	38,34	38,63	16,28	51,55	9,61	8,22	32,84	58,85	25,15	23,23
1,44 – 1,62	9	36,47	36,38	36,68	37,53	27,27	28,85	24,24	15,06	42,63	43,86	40,16	31,56
1,62 – 1,80	10	35,82	35,60	35,66	35,44	39,83	45,28	43,76	49,67	51,65	55,11	54,17	57,75
1,80 – 1,98	11	34,78	34,19	35,49	34,47	73,68	105,42	48,32	89,20	70,51	84,53	56,95	77,67

c) S3

Camada (m)		Tempo: Inicial											
		Conteúdo de água no solo (% vol.)				Tensão matricial (kPa) - SWRC				Tensão matricial (kPa) – Campbell (1985)			
		0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m	0,2 m	0,4 m	0,7 m	1,0 m
0,00 – 0,18	1	21,83	23,76	23,64	24,14	10,85	7,04	7,22	6,48	17,12	12,31	12,54	11,55
0,18 – 0,36	2	20,94	22,20	23,32	21,03	141,18	79,93	49,51	135,37	23,44	17,72	14,00	22,96
0,36 – 0,54	3	24,11	23,82	22,31	28,82	35,79	40,20	76,36	6,29	11,94	12,64	17,33	5,08
0,36 – 0,72	4	25,59	24,97	23,01	31,17	20,04	25,42	56,45	2,93	8,98	10,09	14,94	3,49
0,72 – 0,90	5	28,73	30,55	26,30	34,22	46,02	20,18	151,16	4,38	14,40	10,25	23,53	5,46
0,90 – 1,08	6	34,89	37,51	31,72	38,26	69,20	15,17	506,02	10,06	68,31	31,68	187,01	25,73
1,08 – 1,26	7	39,45	41,04	38,51	41,19	5,30	2,31	8,74	2,14	18,60	12,21	23,97	11,76
1,26 – 1,44	8	38,83	37,47	40,64	40,11	7,38	15,49	2,83	3,74	22,00	32,02	13,55	15,59
1,44 – 1,62	9	38,57	37,55	38,71	39,37	8,46	14,88	7,88	5,53	23,58	31,37	22,73	19,01
1,62 – 1,80	10	36,74	36,56	37,26	35,92	23,49	26,03	17,50	37,68	39,53	41,64	34,05	50,22
1,80 – 1,98	11	35,16	34,39	36,94	36,03	58,68	93,19	20,94	35,26	62,84	79,41	37,29	48,56

Apêndice C

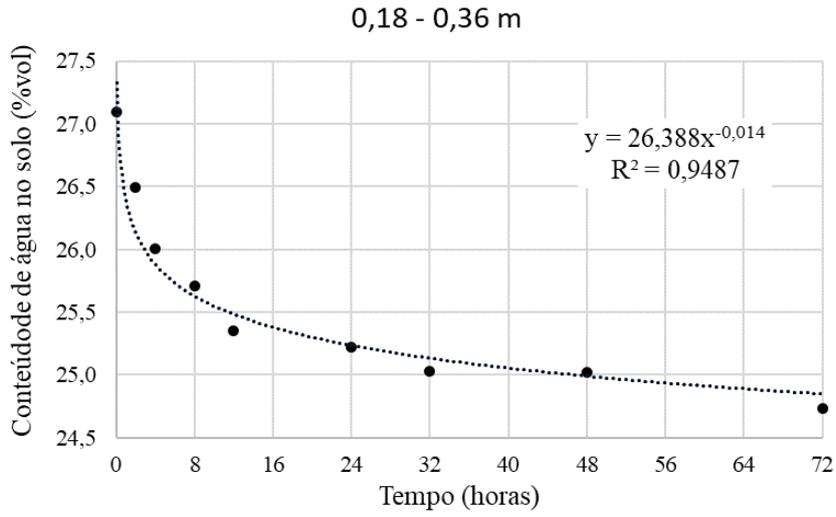
Regressões potenciais e equações para a relação conteúdo de água no solo e tempo para as camadas de

a) 0,18 – 0,36 m

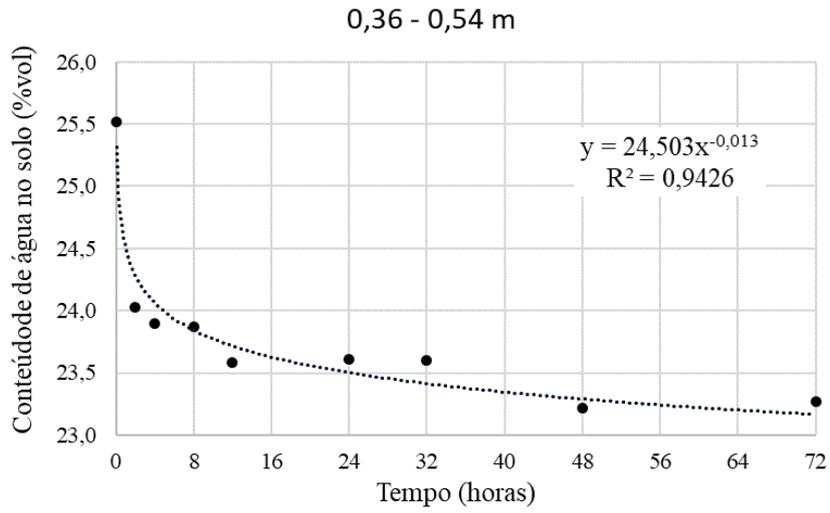
b) 0,36 – 0,54 m

c) 0,72 – 0,90 m

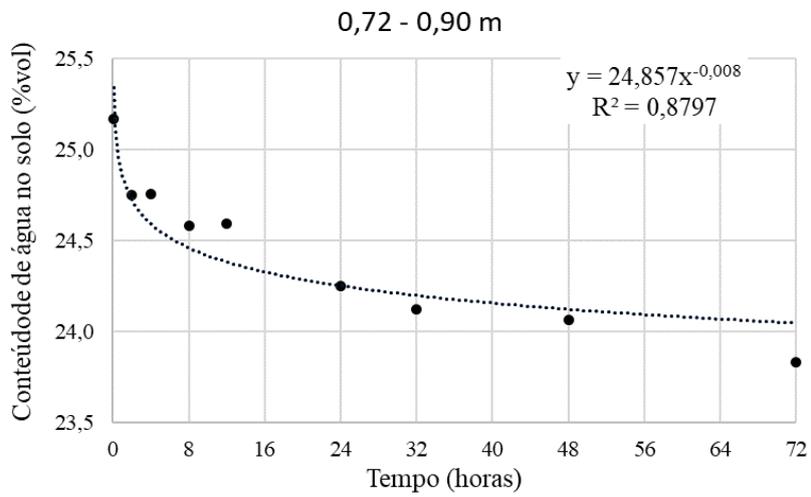
a)



b)



c)



Apêndice D

Curvas de calibração do modelo GA-ML

a) S1_R1

b) S1_R2

c) S1_R3

d) S2_R1

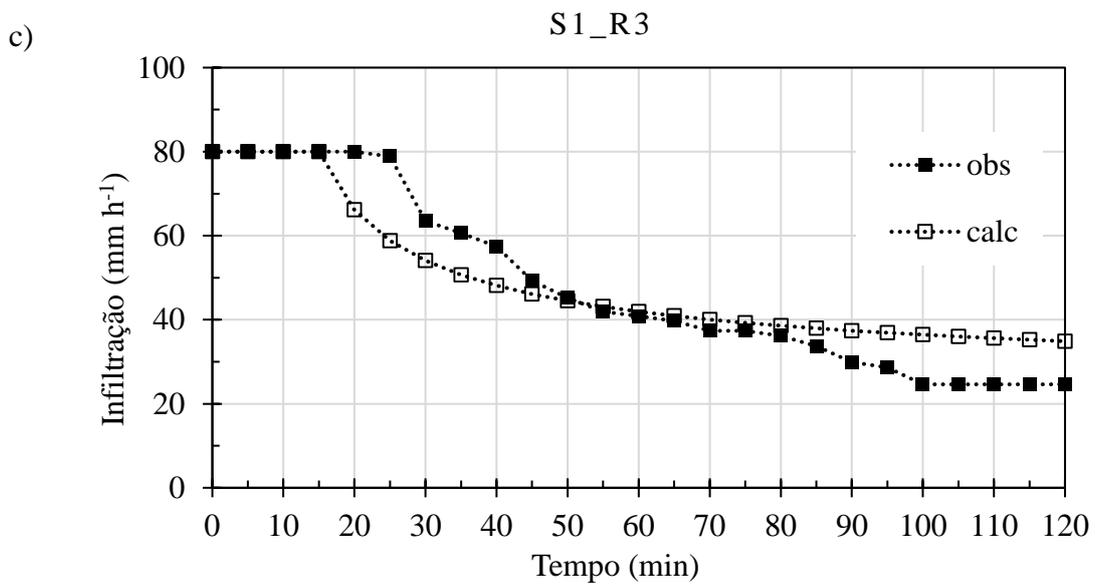
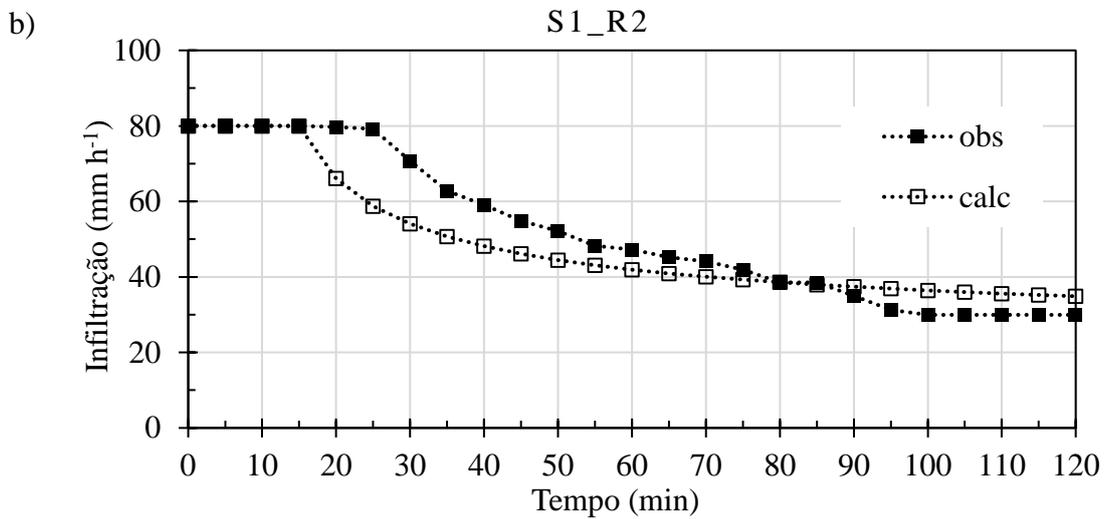
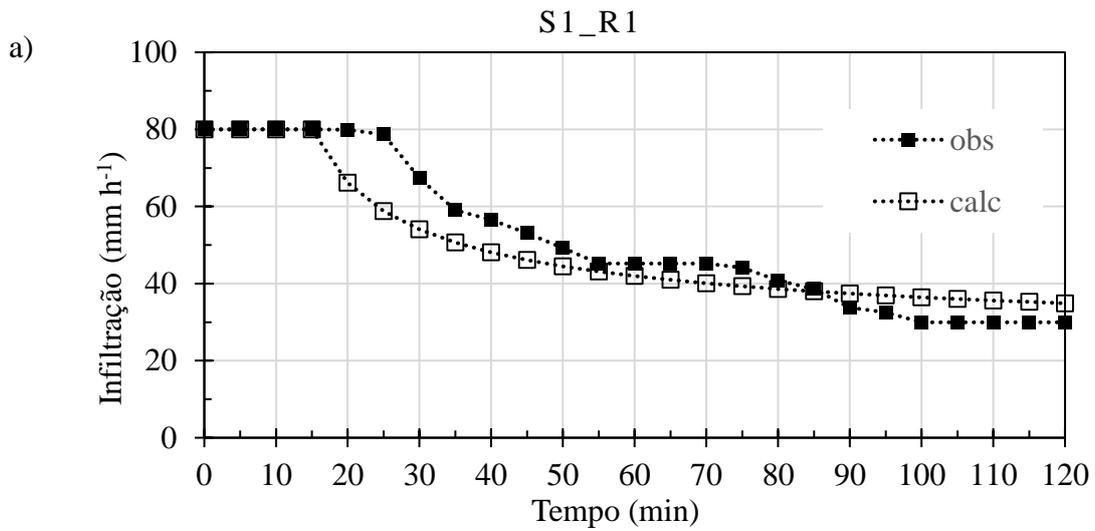
e) S2_R2

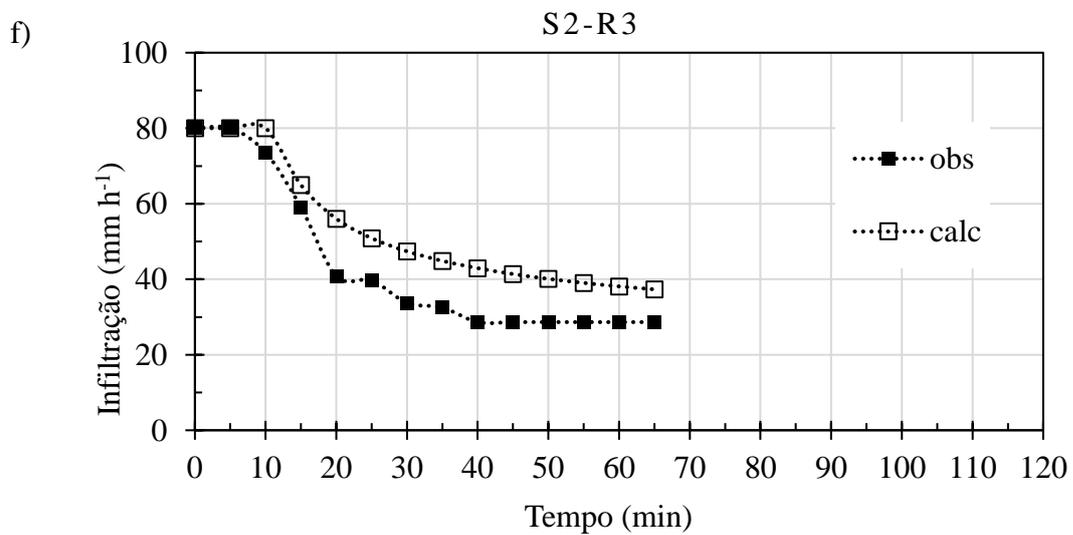
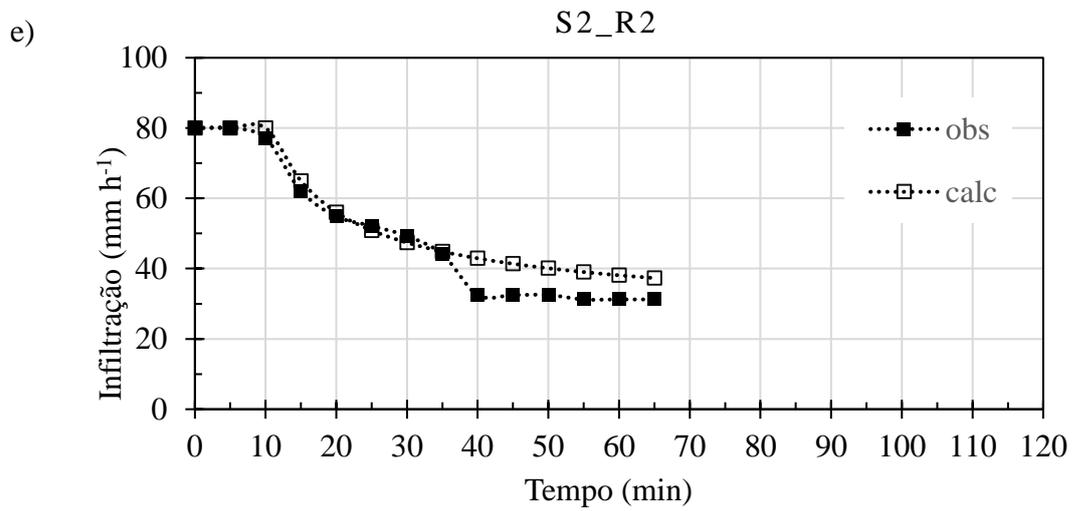
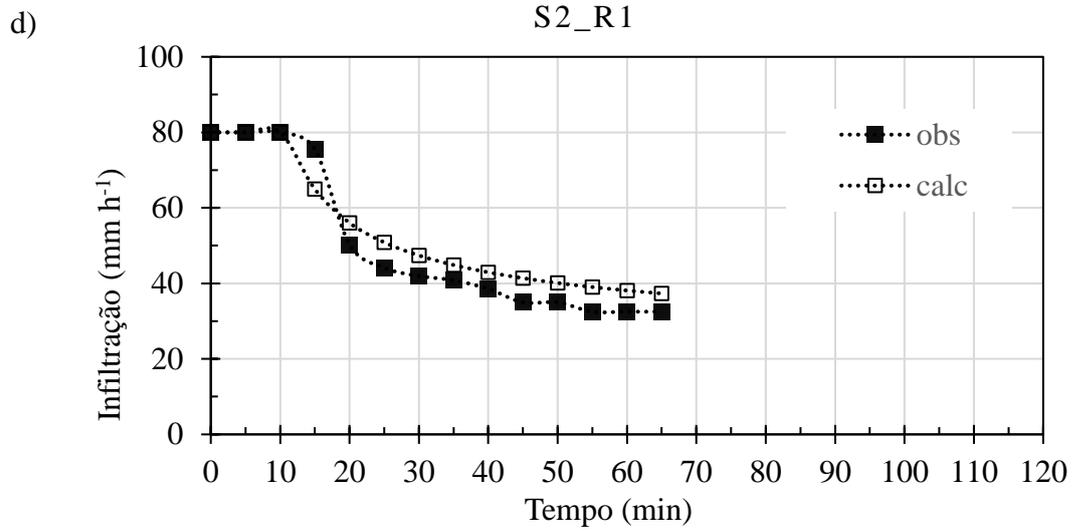
f) S2_R3

g) S3_R1

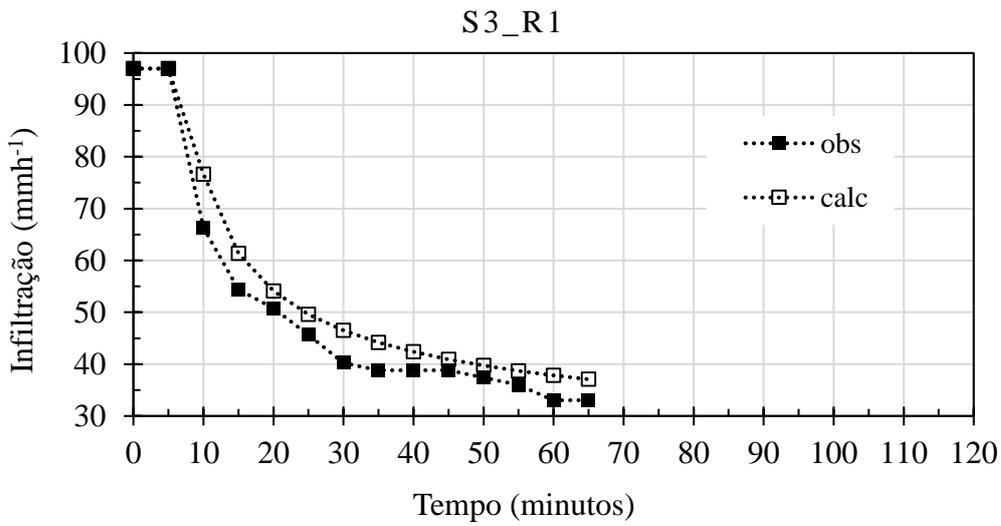
h) S3_R2

i) S3_R3

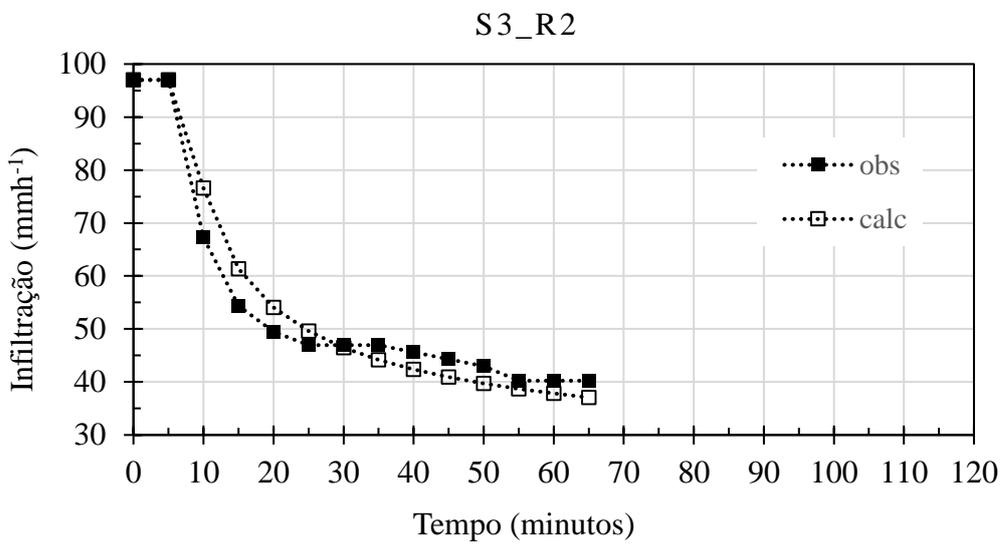




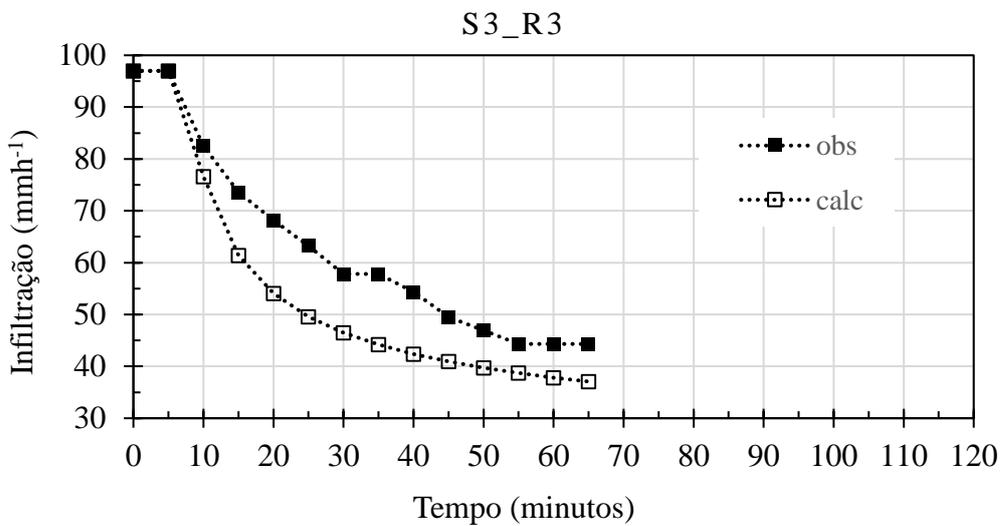
g)



h)



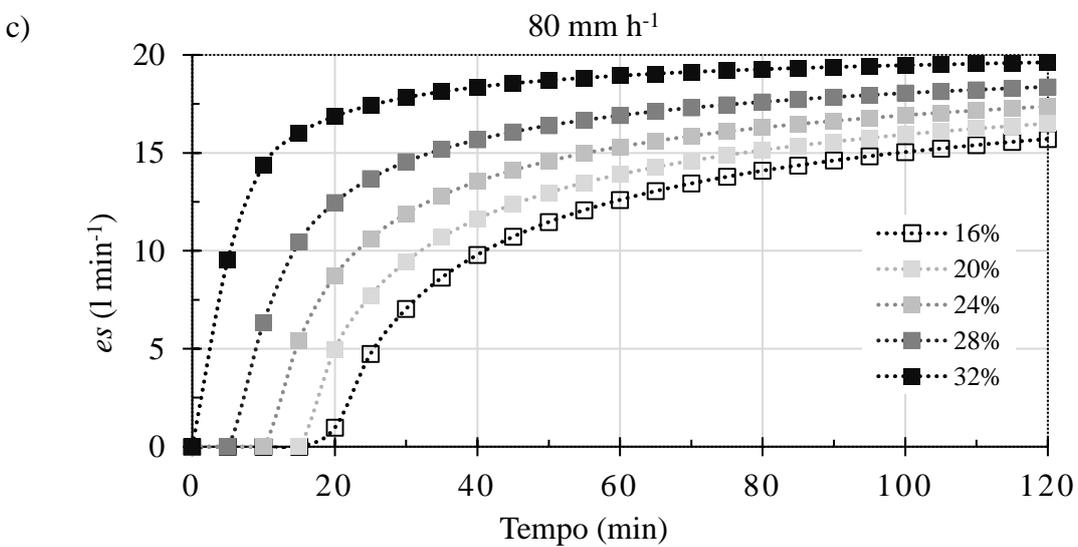
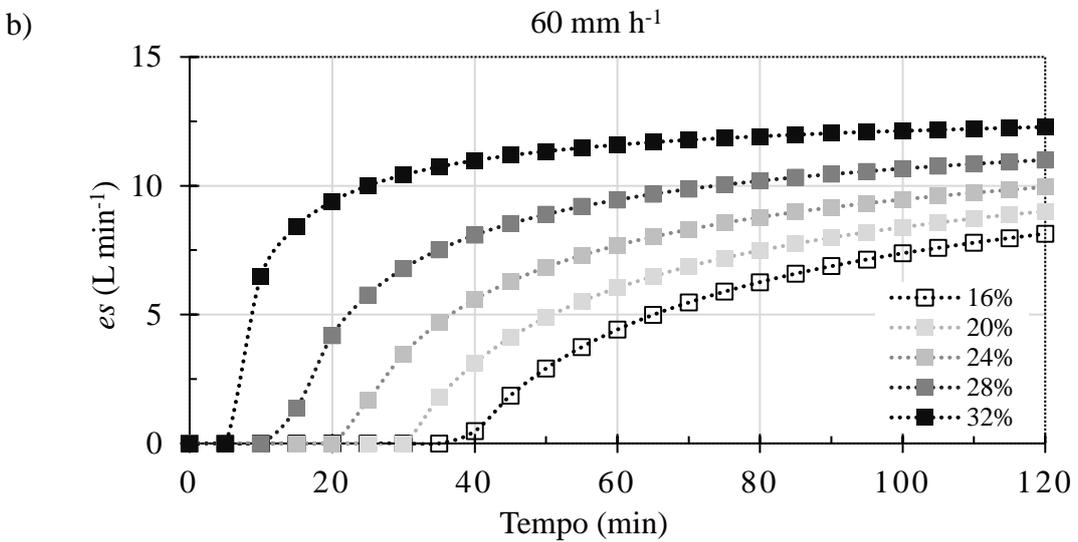
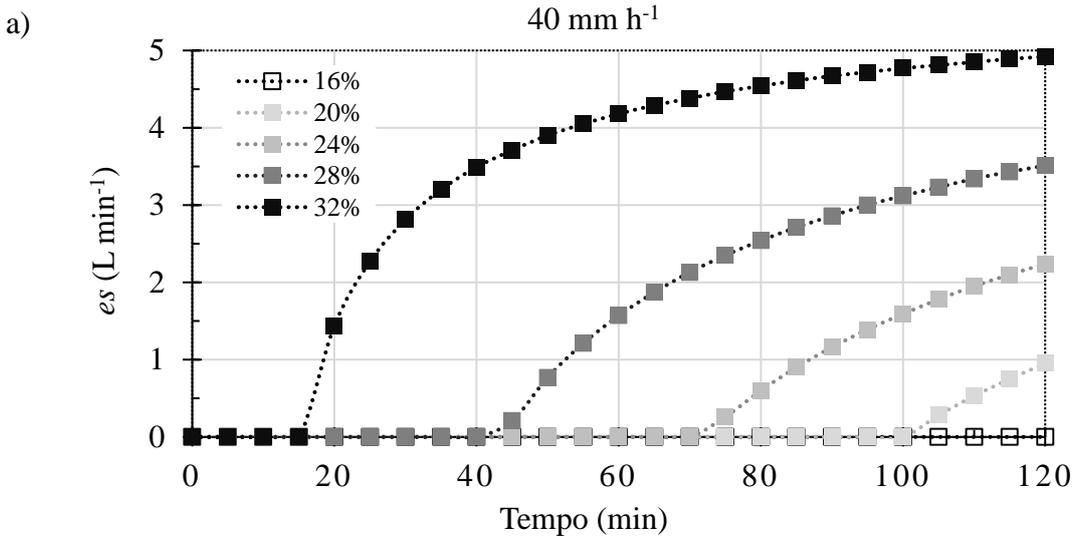
i)

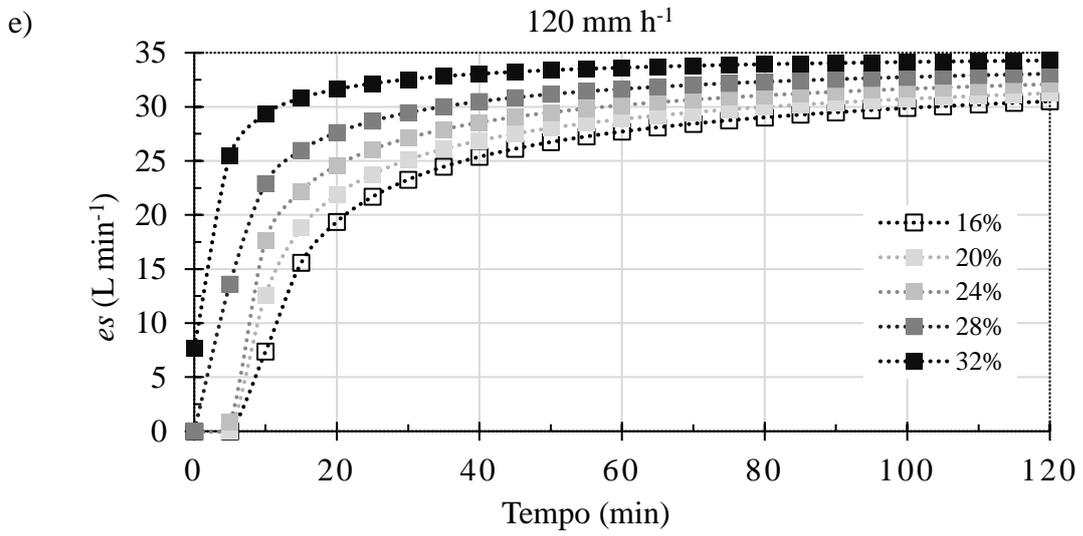
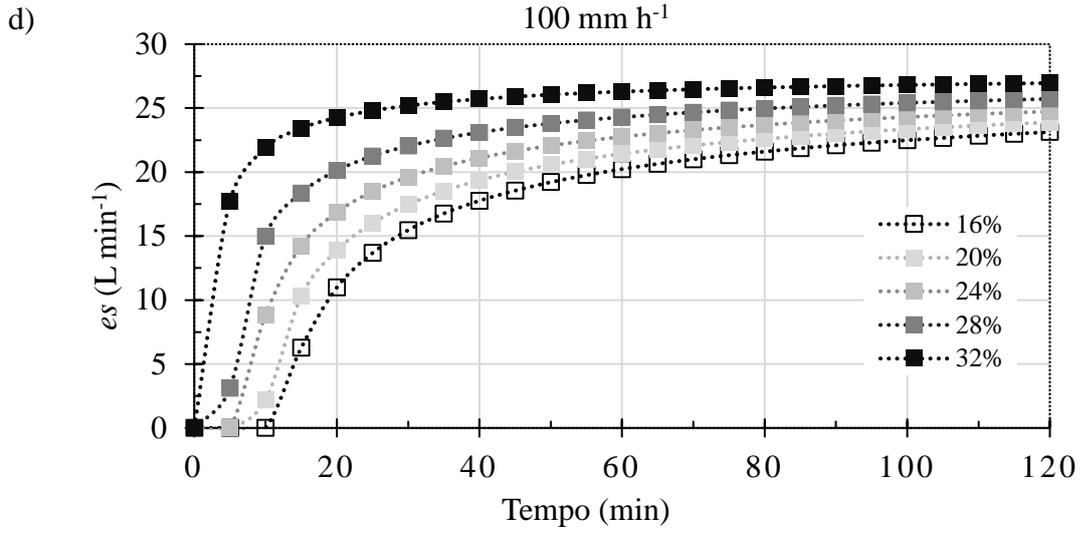


Apêndice E

Curvas do escoamento superficial (es) simulado pelo modelo de GA-ML

- a) Chuva de 40 mm h⁻¹
- b) Chuva de 60 mm h⁻¹
- c) Chuva de 80 mm h⁻¹
- d) Chuva de 100 mm h⁻¹
- e) Chuva de 120 mm h⁻¹





Apêndice F

Matrizes do conteúdo de água no solo geradas pelo modelo Infil2D

- a) Solo franco argiloso inicial e após 1, 6 e 24 h de infiltração
- b) Solo argiloso inicial e após 1, 6 e 24 h de infiltração
- c) Solo franco arenoso inicial e após 1, 6 e 24 h de infiltração

a) Solo franco argiloso após 1 hora de infiltração

Prof. (m)		Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03	Sulco do VM	50,9	48,7	45,7	42,3	40,6	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
0,08		50,9	48,9	45,9	42,5	40,7	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6
0,15		50,9	49,0	46,1	42,7	40,9	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7	40,7
0,25		50,9	49,0	46,1	42,8	41,1	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9
0,35		50,9	48,7	45,8	42,6	41,2	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1
0,43	50,9	49,7	47,6	44,7	42,1	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	
0,50	48,5	47,7	45,9	43,2	41,6	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	41,4	
0,60	45,6	45,0	43,4	42,0	41,7	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	
0,70	43,0	42,7	42,1	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9	
0,80	42,2	42,2	42,2	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	
0,90	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	42,4	
1,00	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7	
1,10	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0	
1,25	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	
1,45	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	
1,65	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	
1,85	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	

a) Solo franco argiloso após 24 horas de infiltração

Prof. (m)		Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03	Sulco do VM	50,9	49,5	48,2	47,2	46,4	45,5	44,7	43,9	43,1	42,3	41,6	41,0	40,7	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
0,08		50,9	49,8	48,6	47,6	46,7	45,8	44,9	44,1	43,2	42,4	41,7	41,2	40,8	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6
0,15		50,9	50,0	49,0	48,0	47,0	46,1	45,3	44,4	43,5	42,6	41,9	41,3	41,0	40,8	40,7	40,7	40,7	40,7
0,25		50,9	50,2	49,2	48,3	47,4	46,5	45,6	44,6	43,7	42,9	42,1	41,5	41,2	41,0	40,9	40,9	40,9	40,9
0,35		50,9	50,2	49,3	48,4	47,5	46,7	45,8	44,8	43,9	43,1	42,3	41,8	41,4	41,2	41,1	41,1	41,1	41,1
0,43	50,9	50,6	50,1	49,3	48,4	47,6	46,7	45,8	44,9	44,0	43,2	42,4	41,9	41,6	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3
0,50	50,4	50,2	49,8	49,2	48,4	47,6	46,8	45,9	45,0	44,1	43,3	42,6	42,0	41,7	41,5	41,4	41,4	41,4	41,4
0,60	49,9	49,8	49,5	48,9	48,3	47,5	46,7	45,9	45,0	44,1	43,4	42,7	42,2	41,9	41,7	41,7	41,6	41,6	41,6
0,70	49,4	49,3	49,1	48,7	48,1	47,4	46,6	45,8	44,9	44,1	43,4	42,8	42,4	42,1	41,9	41,9	41,9	41,9	41,9
0,80	49,0	48,9	48,8	48,3	47,8	47,1	46,4	45,6	44,8	44,1	43,4	42,9	42,5	42,3	42,2	42,2	42,1	42,1	42,1
0,90	48,5	48,5	48,3	48,0	47,5	46,8	46,2	45,4	44,7	44,0	43,5	43,0	42,7	42,6	42,5	42,4	42,4	42,4	42,4
1,00	48,1	48,0	47,9	47,6	47,1	46,5	45,9	45,2	44,6	44,0	43,5	43,2	42,9	42,8	42,7	42,7	42,7	42,7	42,7
1,10	47,6	47,5	47,4	47,1	46,7	46,2	45,6	45,1	44,5	44,0	43,6	43,4	43,2	43,1	43,1	43,0	43,0	43,0	43,0
1,25	46,9	46,8	46,7	46,5	46,1	45,7	45,3	44,8	44,5	44,1	43,9	43,7	43,7	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6
1,45	46,3	46,2	46,2	46,0	45,8	45,5	45,2	45,0	44,8	44,6	44,5	44,5	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4
1,65	46,2	46,2	46,2	46,1	46,0	45,9	45,8	45,6	45,6	45,5	45,5	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
1,85	47,0	47,0	47,0	47,0	46,9	46,9	46,9	46,8	46,8	46,8	46,8	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7

b) Solo argiloso após 1 hora de infiltração

Prof. (m)		Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03	Sulco do VM	50,9	49,2	47,0	46,1	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0
0,08		50,9	49,3	47,1	46,2	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1
0,15		50,9	49,3	47,2	46,3	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
0,25		50,9	49,3	47,3	46,4	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3
0,35		50,9	49,2	47,3	46,6	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5
0,43	50,9	50,0	48,5	47,0	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	
0,50	49,1	48,6	47,4	46,8	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	
0,60	47,5	47,3	47,0	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	
0,70	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	
0,80	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	
0,90	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	
1,00	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	
1,10	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	
1,25	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	
1,45	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	
1,65	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	
1,85	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	

b) Solo argiloso após 24 horas de infiltração

Prof. (m)		Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03	Sulco do VM	50,9	50,2	49,5	48,9	48,3	47,7	47,2	46,7	46,4	46,2	46,1	46,1	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0
0,08		50,9	50,3	49,6	49,0	48,4	47,8	47,3	46,8	46,5	46,3	46,2	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1
0,15		50,9	50,4	49,8	49,2	48,5	47,9	47,4	46,9	46,6	46,4	46,3	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
0,25		50,9	50,4	49,8	49,2	48,6	48,0	47,5	47,0	46,7	46,5	46,4	46,4	46,4	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3
0,35		50,9	50,4	49,8	49,2	48,6	48,1	47,6	47,1	46,8	46,6	46,6	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5	46,5
0,43	50,9	50,6	50,2	49,7	49,1	48,6	48,1	47,6	47,2	46,9	46,7	46,7	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6	46,6
0,50	50,3	50,2	50,0	49,5	49,0	48,5	48,0	47,6	47,2	47,0	46,8	46,8	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7
0,60	49,8	49,8	49,6	49,2	48,8	48,4	47,9	47,6	47,3	47,1	47,0	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9
0,70	49,4	49,4	49,2	48,9	48,6	48,2	47,9	47,6	47,4	47,2	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1	47,1
0,80	49,0	49,0	48,9	48,7	48,4	48,1	47,8	47,6	47,5	47,4	47,3	47,3	47,3	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2
0,90	48,7	48,7	48,6	48,4	48,2	48,0	47,8	47,7	47,6	47,5	47,5	47,5	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
1,00	48,5	48,5	48,4	48,3	48,2	48,0	47,9	47,8	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7
1,10	48,4	48,4	48,4	48,3	48,2	48,1	48,0	48,0	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9	47,9
1,25	48,5	48,5	48,4	48,4	48,4	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3
1,45	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8	48,8
1,65	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5
1,85	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5

c) Solo franco arenoso após 1 hora de infiltração

Prof. (m)	Sulco do VM	Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03		43,4	39,8	36,0	31,6	26,2	23,5	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4
0,08		43,4	40,4	36,7	32,1	26,6	23,7	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
0,15		43,4	40,9	37,2	32,7	27,2	23,9	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7
0,25		43,4	41,0	37,4	32,9	27,4	24,1	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
0,35		43,4	40,8	37,0	32,3	26,9	24,3	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
0,43	43,4	42,2	39,8	35,8	31,0	25,9	24,4	24,4	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
0,50	41,0	40,2	37,8	33,8	28,7	25,0	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6
0,60	37,6	36,8	34,4	30,1	25,9	24,9	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
0,70	33,2	32,3	29,9	26,3	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2
0,80	28,2	27,6	26,2	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5
0,90	26,0	26,0	25,9	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
1,00	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2	26,2
1,10	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6
1,25	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
1,45	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
1,65	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
1,85	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7

c) Solo franco arenoso após 24 horas de infiltração

Prof. (m)		Distância do sulco do VM (m)																	
		0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15
0,03	Sulco do VM	43,4	40,3	37,7	35,9	34,4	33,2	32,0	31,0	29,9	28,7	27,4	26,1	24,9	23,7	23,4	23,4	23,4	23,4
0,08		43,4	41,0	38,6	36,7	35,1	33,8	32,6	31,4	30,2	29,0	27,7	26,4	25,1	23,8	23,5	23,5	23,5	23,5
0,15		43,4	41,6	39,5	37,6	36,0	34,6	33,3	32,1	30,8	29,5	28,2	26,8	25,5	24,1	23,7	23,7	23,7	23,7
0,25		43,4	41,9	40,1	38,4	36,8	35,4	34,1	32,8	31,5	30,2	28,8	27,4	26,0	24,5	24,0	23,9	23,9	23,9
0,35		43,4	42,1	40,5	38,9	37,4	36,0	34,7	33,4	32,1	30,8	29,4	28,0	26,6	24,9	24,2	24,2	24,2	24,2
0,43	43,4	43,0	42,0	40,6	39,1	37,7	36,4	35,1	33,8	32,5	31,2	29,8	28,4	27,0	25,2	24,5	24,4	24,3	24,3
0,50	42,8	42,6	41,9	40,6	39,3	38,0	36,7	35,4	34,2	32,9	31,6	30,2	28,7	27,3	25,5	24,7	24,6	24,6	24,6
0,60	42,3	42,2	41,6	40,6	39,4	38,2	37,0	35,8	34,5	33,3	32,0	30,6	29,2	27,7	25,9	25,0	24,9	24,8	24,8
0,70	41,9	41,8	41,4	40,5	39,5	38,4	37,2	36,0	34,8	33,6	32,3	30,9	29,5	28,1	26,3	25,3	25,2	25,2	25,2
0,80	41,6	41,5	41,2	40,4	39,5	38,5	37,4	36,2	35,1	33,9	32,6	31,2	29,8	28,4	26,6	25,7	25,5	25,5	25,5
0,90	41,3	41,2	41,0	40,3	39,5	38,5	37,5	36,4	35,3	34,1	32,8	31,5	30,1	28,7	27,0	26,0	25,9	25,8	25,8
1,00	41,1	41,0	40,8	40,2	39,4	38,5	37,5	36,5	35,4	34,2	33,0	31,7	30,3	29,0	27,3	26,4	26,2	26,2	26,2
1,10	40,8	40,7	40,5	40,0	39,3	38,5	37,6	36,5	35,5	34,3	33,1	31,9	30,5	29,3	27,7	26,8	26,7	26,6	26,6
1,25	40,4	40,4	40,2	39,7	39,1	38,4	37,5	36,6	35,6	34,5	33,3	32,1	30,8	29,7	28,2	27,5	27,4	27,3	27,3
1,45	40,0	39,9	39,8	39,4	38,8	38,1	37,4	36,5	35,5	34,5	33,4	32,3	31,3	30,3	29,1	28,6	28,5	28,4	28,4
1,65	39,3	39,2	39,1	38,8	38,3	37,7	37,0	36,2	35,4	34,5	33,6	32,7	31,9	31,1	30,4	30,0	29,9	29,9	29,8
1,85	37,9	37,9	37,8	37,5	37,2	36,8	36,3	35,7	35,1	34,5	33,9	33,3	32,8	32,4	32,0	31,8	31,7	31,7	31,7

ANEXO A

Descrição do modelo Infil2D

- A1. Derivation of the explicit finite difference equation for infiltration (water flow) in two dimensions
- A2. QB64 code for the programme “Infil2D”
- A3. List of variables in the programme “Infil2D”
- A4. Description of the programme “Infil2D”

A1. Derivation of the explicit finite difference equation for infiltration (water flow) in two dimensions

This equation and the ones required to derive it form the core of the programme “Infil2D”, i.e. the main computation loop (line 109 to 169) in the programme code presented in Chapter A2. To highlight this, the line numbers where they appear in the code are stated in the text below.

The first step is to divide the area of interest into a grid of rectangular elements (Figure A1). The horizontal direction is denoted here as x , the vertical one as z . The positive x direction is defined from left to right, the positive z direction from top to bottom. Along a given row, i.e. in the x direction, the height of the elements must be the same, and along a given column, i.e. in the z direction, the width of the elements must be the same. However, height and width can differ between rows and columns, respectively. In regions of the area of interest where there is a rapid change in water content with time due to infiltration small elements should be used to get a good spatial resolution. Where these changes are slow larger elements suffice. One can use the same small dimensions for all elements, but this leads to a lot of elements and therefore a long computation time.

The width of an element is denoted as dx , the height as dz . There is also a depth dy into the plane of view. For a two-dimensional model dy is set to a unit depth, for example to 1 m or 1 cm. A so called node point (or simply node) is placed at the centre of each element. Each node is identified by an x,z index. The numbering starts with 0 and ends with $n+1$. The horizontal distance between two node points is called Δx , the vertical distance Δz .

A node represents the hydraulic properties of the element, i.e. water content, water potential, and hydraulic conductivity. During infiltration, or water movement in general, the values of these properties change from one point in time to the next. The purpose of the equation derived here is to compute the new values. It is solved successively for a series of time steps.

The nodes with numbers 1 to n are called inner nodes. These are the nodes for which new values of water content, water potential, and hydraulic conductivity are computed for each time step. The nodes which contain a 0 or an $n+1$ are called boundary nodes. The successful application of the finite difference equation requires that the hydraulic conditions at the boundary nodes are known at all times. Hence, no values need to be computed for the boundary nodes. Let's now turn to the actual derivation of the finite difference equation.

Figure 1A: Schematic of a finite difference grid with a ditch. x^+ = positive x-direction z^+ = positive z-direction

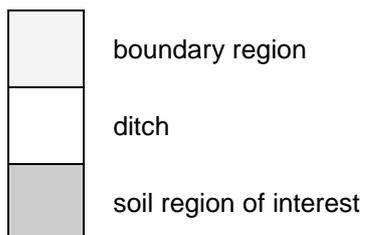
● = inner node,

○ = boundary node

○ = node in a ditch

$\longrightarrow x^+$
 $\downarrow z^+$

	0	1	2	3	4	5	6	7	n	n+1
1	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
2	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
3	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
4	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
n	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
n+1	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●



The change in water content in an element over a certain time is given by the difference in inflow and outflow. In two dimensions the relevant equation reads:

$$V \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = (Q_{inx} - Q_{outx}) + (Q_{inz} - Q_{outz}) \quad (1)$$

V = volume of the element

θ = water content (water filled porosity)

Δt = time step

Q_{inx} = flow into the element in the x-direction

Q_{outx} = flow out of the element in the x-direction

Q_{inz} = flow into the element in the z-direction

Q_{outz} = flow out of the element in the z-direction

Note that the subscript “in” does not simply stand for inflow. It indicates an inflow only if flow is in the positive x or z direction. However, flow can also take place in the negative x or z direction. In this case Q_{inx} , for example, is actually an outflow. Because its numerical value is negative, one can think of this outflow as a negative inflow. The analogous goes for the subscript “out”.

Flow is described with the Darcy equation:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta L} \quad (2)$$

K = soil hydraulic conductivity

A = cross-sectional area of flow

τ = soil water potential expressed as a tension

ΔL = distance between the midpoints of two adjacent elements

Substitution of equation 2 into equation 1 and considering the x- and z-direction one arrives at the following equation for node x,y:

$$V_{x,z} \cdot \frac{\Delta\theta_{x,z}}{\Delta t} = \left(K_{inx} \cdot A_{inx} \cdot \frac{\Delta\tau_{inx}}{\Delta x_{in}} - K_{outx} \cdot A_{outx} \cdot \frac{\Delta\tau_{outx}}{\Delta x_{out}} \right) + \left(K_{inz} \cdot A_{inz} \cdot \frac{\Delta\tau_{inz}}{\Delta z_{in}} - K_{outz} \cdot A_{outz} \cdot \frac{\Delta\tau_{outz}}{\Delta z_{out}} \right) \quad (3)$$

The volume of an element is:

$$V_{x,z} = dx_{x,z} \cdot dy_{x,z} \cdot dz_{x,z} \quad (4)$$

$dx_{x,z}$ = extent of the element x,z in the x direction

$dy_{x,z}$ = extent of the element x,z in the y direction

$dz_{x,z}$ = extent of the element x,z in the z direction

Since $\Delta\theta$ is the change in water content from time t to time t+ Δt , i.e. over a time step Δt , one can write:

$$\Delta\theta = \theta_{x,z}^{t+\Delta t} - \theta_{x,z}^t \quad (5)$$

The conductivities between two elements, i.e. K_{inx} , K_{outx} , K_{inz} and K_{outz} , are evaluated as follows (line 119-122):

$$K_{inx} = K_{x-1,z}^t \quad (6a)$$

$$K_{outx} = K_{x,z}^t \quad (6b)$$

$$K_{inz} = K_{x,z-1}^t \quad (6c)$$

$$K_{outz} = K_{x,z}^t \quad (6d)$$

Observe that all K 's have now been given the superscript t , as will the τ 's below. The reason will become clear later. Quite often the conductivity in the horizontal direction (x) differs from that in the vertical (z) direction. However, usually data are only available for one direction. Therefore the model assumes that the conductivity at a node is the same in both directions.

The cross-sectional area of flow does not change along a line of nodes. Hence:

$$A_{inx} = A_{outx} = dy \cdot dz \quad (7a)$$

$$A_{inz} = A_{outz} = dx \cdot dy \quad (7b)$$

Now, looking at a node x,z in figure A1 it follows that:

$$\Delta\tau_{inx} = \tau_{x,z}^t - \tau_{x-1,z}^t \quad (8a)$$

$$\Delta\tau_{outx} = \tau_{x+1,z}^t - \tau_{x,z}^t \quad (8b)$$

$$\Delta\tau_{inz} = \tau_{x,z}^t - \tau_{x,z-1}^t \quad (8c)$$

$$\Delta\tau_{outz} = \tau_{x,z+1}^t - \tau_{x,z}^t \quad (8d)$$

Combining equations 3 to 8 one arrives at:

$$\begin{aligned} dx_{x,z} \cdot dy_{x,z} \cdot dz_{x,z} \cdot \frac{\theta_{x,z}^{t+\Delta t} - \theta_{x,z}^t}{\Delta t} = & \\ & \left(K_{x-1,z}^t \cdot dy_{x,z} \cdot dz_{x,z} \cdot \frac{\tau_{x,z}^t - \tau_{x-1,z}^t}{\Delta x_{in}} - K_{x,z}^t \cdot dy_{x,z} \cdot dz_{x,z} \cdot \frac{\tau_{x+1,z}^t - \tau_{x,z}^t}{\Delta x_{out}} \right) + \\ & \left(K_{x,z-1}^t \cdot dx_{x,z} \cdot dy_{x,z} \cdot \frac{\tau_{x,z}^t - \tau_{x,z-1}^t}{\Delta z_{in}} - K_{x,z}^t \cdot dx_{x,z} \cdot dy_{x,z} \cdot \frac{\tau_{x,z+1}^t - \tau_{x,z}^t}{\Delta z_{out}} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

Equation 9 is a finite difference formulation of the Richards equation for two-dimensional water flow in a soil. Multiplying both sides with Δt , dividing both sides by $dx_{x,z} \cdot dy_{x,z} \cdot dz_{x,z}$, and collecting terms yields:

$$\theta_{x,z}^{t+\Delta t} - \theta_{x,z}^t = \left(\frac{K_{x-1,z}^t \cdot \Delta t}{dx_{x,z} \cdot \Delta x_{in}} \cdot (\tau_{x,z}^t - \tau_{x-1,z}^t) - \frac{K_{x,z}^t \cdot \Delta t}{dx_{x,z} \cdot \Delta x_{out}} \cdot (\tau_{x+1,z}^t - \tau_{x,z}^t) \right) + \left(\frac{K_{x,z-1}^t \cdot \Delta t}{dz_{x,z} \cdot \Delta z_{in}} \cdot (\tau_{x,z}^t - \tau_{x,z-1}^t) - \frac{K_{x,z}^t \cdot \Delta t}{dz_{x,z} \cdot \Delta z_{out}} \cdot (\tau_{x,z+1}^t - \tau_{x,z}^t) \right) \quad (10)$$

For brevity let's define (line 131-134):

$$\kappa_{inx} = \frac{K_{x-1,z}^t \cdot \Delta t}{dx_{x,z} \cdot \Delta x_{in}} \quad (11a)$$

$$\kappa_{outx} = \frac{K_{x,z}^t \cdot \Delta t}{dx_{x,z} \cdot \Delta x_{out}} \quad (11b)$$

$$\kappa_{inz} = \frac{K_{x,z-1}^t \cdot \Delta t}{dz_{x,z} \cdot \Delta z_{in}} \quad (11c)$$

$$\kappa_{outz} = \frac{K_{x,z}^t \cdot \Delta t}{dz_{x,z} \cdot \Delta z_{out}} \quad (11d)$$

Using these expressions in equation 10 results in:

$$\theta_{x,z}^{t+\Delta t} - \theta_{x,z}^t = \left(\kappa_{inx} \cdot (\tau_{x,z}^t - \tau_{x-1,z}^t) - \kappa_{outx} \cdot (\tau_{x+1,z}^t - \tau_{x,z}^t) \right) + \left(\kappa_{inz} \cdot (\tau_{x,z}^t - \tau_{x,z-1}^t) - \kappa_{outz} \cdot (\tau_{x,z+1}^t - \tau_{x,z}^t) \right) \quad (12)$$

Finally, resolving the brackets, collecting terms, and moving $\theta_{x,z}^t$ to the right hand side gives (line 144-147):

$$\theta_{x,z}^{t+\Delta t} = \theta_{x,z}^t + (\kappa_{inx} + \kappa_{outx} + \kappa_{inz} + \kappa_{outz}) \cdot \tau_{x,z}^t - (\kappa_{inx} \cdot \tau_{x-1,z}^t + \kappa_{outx} \cdot \tau_{x+1,z}^t + \kappa_{inz} \cdot \tau_{x,z-1}^t + \kappa_{outz} \cdot \tau_{x,z+1}^t) \quad (13)$$

Using the so-called Jacobi iteration one can compute with equation 13 the new water content at time $t+\Delta t$ at each inner node, based on the previous values of the water content and soil moisture tensions at that node, the soil moisture tensions of the surrounding nodes, and the hydraulic conductivities (veiled in the κ -terms) at that node as well as the one to the left and above.

The Jacobi iteration (line 115-150) works as follows: One starts the computations in row $z = 1$ at the node in column $x = 1$ and proceeds along this row to the node in column $x = n$, i.e. to the node $(n,1)$. Then one continues in the next row ($z = 2$) at the node in column $x = 1$ until the node in column $x = n$ in this row is reached, i.e. the node $(n,2)$, and so on, until one arrives at the node (n,n) . This is called "sweeping the field". Note that while sweeping the field the water contents at time t are used. The just computed new water contents are not

used until the subsequent sweep. After the sweep is completed the new θ 's are used to compute new values for τ and K at each inner node (line 158-160). Then the whole procedure is repeated for the next time step, until one gets to the desired end time.

Because the new water content at time $t+\Delta t$ is expressed as a function of the old water content at time t plus some other parameters at time t , equation 13 is an explicit solution of the Richards equation in two dimensions. A weakness of the explicit solution is that one must proceed in very small time steps to obtain a stable solution. This is assured, if all κ -terms are ≤ 0.25 (line 139-142).

A2. QB64 code for the programme "Infil2D"

```

1      'Infil2D - an explicit 2D infiltration model for vertical mulching with Jacobi
2      iteration
3      '          16.03.2017
4
5      CLS
6
7      DEFDBL A-W
8      DEFINT X,Z
9
10     f$ = "c:\aprogs\infil2d\inthesis2.dat"
11     OPEN f$ for INPUT as #1
12
13     g$ = "c:\aprogs\infil2d\outthesis.dat"
14     OPEN g$ for OUTPUT as #2
15
16
17     '----- data input and initialization -----
18
19     INPUT #1, dt
20     INPUT #1, tpr, ti, tend
21
22     INPUT #1, nx, nz, ns
23
24     nnx = nx+1
25     nnz = nz+1
26
27     DIM dx(nnx), ddx(nnx), dz(nnz), ddz(nnz)
28     DIM f(nnx), g(nnz)
29     DIM a(nnx,nnz), b(nnx,nnz), m(nnx,nnz)
30     DIM Ws(nnx,nnz), Wo(nnx,nnz), W(nnx,nnz)
31     DIM Pe(nnx,nnz), Pm(nnx,nnz), P(nnx,nnz)
32     DIM Ks(nnx,nnz), K(nnx,nnz)
33
34     sdx = 0
35     FOR x = 0 to nnx
36         INPUT #1, dx(x)
37         f(x) = sdx + dx(x) / 2
38         sdx = sdx + dx(x)
39         IF x > 0 THEN ddx(x) = f(x) - f(x-1)
40     NEXT x
41
42     sdz = 0
43     FOR z = 0 to nnz
44         INPUT #1, dz(z)
45         g(z) = sdz + dz(z) / 2
46         sdz = sdz + dz(z)
47         IF z > 0 THEN ddz(z) = g(z) - g(z-1)
48     NEXT z
49
50     FOR z = 0 to nnz
51         FOR x = 0 to nnx
52             INPUT #1, a(x,z)

```

```

53     NEXT x
54     NEXT z
55
56     FOR z = 0 to nnz
57     FOR x = 0 to nnx
58     INPUT #1, b(x,z)
59     m(x,z) = -2 * b(x,z) + 3
60     NEXT x
61     NEXT z
62
63     FOR z = 0 to nnz
64     FOR x = 0 to nnx
65     INPUT #1, Ws(x,z)
66     NEXT x
67     NEXT z
68
69     FOR z = 0 to nnz
70     FOR x = 0 to nnx
71     INPUT #1, Ks(x,z)600
72     NEXT x
73     NEXT z
74
75     FOR z = 0 to nnz
76     FOR x = 0 to nnx
77     INPUT #1, Wo(x,z)
78     W(x,z) = Wo(x,z)
79     Pe(x,z) = a(x,z) * Ws(x,z) ^ b(x,z)
80     Pm(x,z) = a(x,z) * W(x,z) ^ b(x,z)
81     P(x,z) = Pm(x,z) + g(z)
82     K(x,z) = Ks(x,z) * (W(x,z) / Ws(x,z)) ^ m(x,z)
83     NEXT x
84     NEXT z
85
86     FOR z = 0 to ns
87     Pm(1,z) = 0
88     P(1,z) = 0
89     K(1,z) = Ks(1,z)
90     NEXT z
91
92     SWold = 0
93     FOR z = 1 TO nz
94     FOR x = 1 TO nx
95     IF x = 1 and z <= ns THEN goto 10
96     SWold = SWold + W(x,z) * dx(x) * dz(z)
97 10  NEXT x
98     NEXT z
99
100    CLOSE #1
101
102
103    '----- computation section -----
104
105    SdSW = 0
106
107    count = 0

```

```

108     nit = 0
109
110     FOR t = dt TO tend STEP dt
111         PRINT t
112
113         count = count + dt
114         nit = nit + 1
115
116         FOR z = 1 TO nz
117             FOR x = 1 TO nx
118                 IF x = 1 and z <= ns THEN goto 20
119
120                 Kinx = (K(x-1,z))
121                 Koutx = (K(x,z))
122                 Kinz = (K(x,z-1))
123                 Koutz = (K(x,z))
124
125                 IF x = 1 THEN Kinx = 0
126                 IF x = nx THEN Koutx = 0
127
128                 IF t > ti and z = 1 THEN Kinz = 0
129                 IF t > ti and x = 2 and z <= ns THEN Kinx = 0
130                 IF t > ti and x = 1 and z = ns+1 THEN Kinz = 0
131
132                 K1 = (Kinx * dt) / (dx(x) * ddx(x))
133                 K2 = (Koutx * dt) / (dx(x) * ddx(x+1))
134                 K3 = (Kinz * dt) / (dz(z) * ddz(z))
135                 K4 = (Koutz * dt) / (dz(z) * ddz(z+1))
136
137                 IF x = 2 and z <= ns THEN K1 = (Kinx * dt) / (dx(x) * dx(x)/2)
138                 IF x = 1 and z = ns+1 THEN K3 = (Kinz * dt) / (dz(z) * dz(z)/2)
139
140                 IF ABS(K1) > 0.25 THEN PRINT "K1 = "; K1, x, z, t : SLEEP
141                 IF ABS(K2) > 0.25 THEN PRINT "K2 = "; K2, x, z, t : SLEEP
142                 IF ABS(K3) > 0.25 THEN PRINT "K3 = "; K3, x, z, t : SLEEP
143                 IF ABS(K4) > 0.25 THEN PRINT "K4 = "; K4, x, z, t : SLEEP
144
145                 fk = K1 + K2 + K3 + K4
146                 PP = K1 * P(x-1,z) + K2 * P(x+1,z) + K3 * P(x,z-1) + K4 * P(x,z+1)
147
148                 W(x,z) = W(x,z) + fk * P(x,z) - PP
149                 if W(x,z) > Ws(x,z) then W(x,z) = Ws(x,z)
150     20     NEXT x
151         NEXT z
152
153         SW = 0
154         FOR z = 1 TO nz
155             FOR x = 1 TO nx
156                 IF x = 1 and z <= ns THEN goto 30
157                 SW = SW + W(x,z) * dx(x) * dz(z)
158
159                 Pm(x,z) = a(x,z) * W(x,z) ^ b(x,z)
160                 P(x,z) = Pm(x,z) + g(z)
161                 K(x,z) = Ks(x,z) * (W(x,z) / Ws(x,z)) ^ m(x,z)

```

```

162 30  NEXT x
163     NEXT z
164
165     dSW = SW - SWold
166     SdSW = SdSW + dSW
167     SWold = SW
168
169     IF count >= tpr THEN GOSUB fprt
170     NEXT t
171
172     PRINT "finished"
173
174     CLOSE #2
175
176     END
177
178
179 '----- output subroutine -----
180
181 fprt:
182     PRINT #2, "water content matrix at time ="; int(t); "min after";
183     PRINT #2, nit; "iterations"
184     PRINT #2,
185
186     PRINT #2, " ";
187     FOR x = 0 TO nnx
188         PRINT #2, USING " ### "; f(x) - dx(1);
189     NEXT x
190
191     PRINT #2, : PRINT #2,
192
193     FOR z = 0 TO nnz
194         PRINT #2, USING "##### "; g(z);
195         FOR x = 0 TO nnx
196             PRINT #2, USING ".### "; W(x,z);
197         NEXT x
198         PRINT #2, : PRINT #2,
199     NEXT z
200
201     PRINT #2, "SW = "; SW
202     PRINT #2, "dSW = "; dSW
203     PRINT #2, "SdSW = "; SdSW
204     PRINT #2, : PRINT #2,
205
206     count = 0
207
208     Return

```

A3. List of variables in the programme “Infil2D”

variable	description	units
a(x,z)	parameter needed to relate soil moisture content to soil matric potential	cm
b(x,z)	parameter needed to relate soil moisture content to soil matric potential	-
count	counts the time since the last time results were printed	min
ddx(x)	horizontal distance between the nodes x-1 and x	cm
ddz(z)	vertical distance between the nodes z-1 and z	cm
dSW	change in the volume of water stored in the soil region of interest between two time steps	cm ³
dt	time step	min
dx(x)	width of the volume represented by node x	cm
dz(z)	height of the volume represented by node z	cm
f\$	variable which contains the name and address of the input file	
f(x)	distance of the node at position x from the left boundary of the grid	cm
fk	intermediate variable for the computation of the new soil water content at a node	
g\$	variable which contains the name and address of the output file	
g(z)	distance of the node at position z from the top of the grid, i.e. from the soil surface	cm
K1	intermediate variable required to test if the solution will be stable	
K2	intermediate variable required to test if the solution will be stable	
K3	intermediate variable required to test if the solution will be stable	
K4	intermediate variable required to test if the solution will be stable	
Kinx	horizontal hydraulic conductivity for the flow going into a node	cm/min
Kinz	vertical hydraulic conductivity for the flow going into a node	cm/min
Koutx	horizontal hydraulic conductivity for the flow going out of a node	cm/min

Koutz	vertical hydraulic conductivity for the flow going out of a node	cm/min
$K(x,z)$	hydraulic conductivity at node x,z	cm/min
$Ks(x,z)$	saturated hydraulic conductivity at node x,z	cm/min
$m(x,z)$	parameter needed to compute the unsaturated hydraulic conductivity from the soil moisture content	-
nit	counter for the number of iterations	-
nnx	total number of nodes in the x (horizontal) direction	-
nnz	total number of nodes in the z (vertical) direction	-
ns	number of nodes in the z (vertical) direction in the ditch	-
nx	number of nodes in the soil region of interest in the x (horizontal) direction	
nz	number of nodes in the soil region of interest in the z (vertical) direction	-
$Pe(x,z)$	air entry potential at node x,z	cm
$Pm(x,z)$	soil matric potential at node x,z	cm
$P(x,z)$	total soil water potential at node x,z	cm
SdSW	sum of the changes in the volume of soil water in the region of interest up to the current time	cm ³
sdx	horizontal distance from the from the left boundary of the grid	cm
sdz	vertical distance from the top of the grid, i.e. from the soil surface	cm
SW	volume of water stored in the grid at a given time	cm ³
SWold	volume of water stored in the grid at a the previous time step	cm ³
t	time	min
tend	time when the run stops	min
ti	time when infiltration stops	min
tpr	time after which results should be printed	min
$W(x,z)$	soil water content at node x,z	cm ³ water / cm ³ soil

$W_o(x,z)$	initial soil water content at node x,z	cm ³ water / cm ³ soil
$W_s(x, z)$	saturated soil water content at node x,z	cm ³ water / cm ³ soil
x	counter for the nodes in the x (horizontal) direction	-
z	counter for the nodes in the z (vertical) direction	-

A4. Description of the programme "Infil2D"

- 1-2 gives the name, purpose and coding date of this version of the programme
- 4 clears the screen
- 6 assigns double precision (16 digits) to all variables beginning with the letters A to W (lower case and upper case)
- 7 defines all variables beginning with the letters X and Z as integers (lower case and upper case)
- 9 states the address and the name of the file where the input data are stored (f\$)
- 10 opens the input data file and assigns it the file number 1
- 12 states the address and the name of the file into which the output of the programme shall be written (g\$)
- 13 opens the output file and assigns it the file number 2
- 16-99 data input and initialization section
- 18 reads the time step (dt) the computations shall proceed in from the input file
- 19 reads the time interval for printing the results of the computations into the output file (tpr), the duration of infiltration (ti), and the time when the computations shall stop (tend)
- 21 reads the number of columns (nx), rows (nz), and the number of rows passing through the ditch (ns)
- 23 while nx is the number of columns one is interested in, one also needs a column on the left and right boundary of the soil region of interest; here the column at the left boundary is given the number 0, the right boundary column the number nx+1; in the programming language QB64 counting starts at 0; hence, if one is interested in 5 columns, for example, then setting nx = 5 allows for 6 columns numbered 0, 1, 2, 3, 4, 5; however, to get the right boundary column, in the example here column number 6, one needs to add 1 to nx; this is the purpose of this line
- 24 analogous to line 23, but for the boundary rows
- 26 allocates computer memory for nnx-times (0 to nx+1) the variables dx and ddx, and for nnz-times (0 to nz+1) the variables dz and ddz
note that dx and ddx may differ between x-positions (columns), but at a given x-position their value must be the same at all z-positions; hence, an index for the row (z) is not required; similarly, dz and ddz may differ between z-positions (rows), but for a given z-position their value must be the same for all x-positions; hence, an index for the column (x) is not required
- 27 analogous to line 26, but for f and g
- 28-31 allocates computer memory for nnx·nnz-times the variables a, b, m, etc.; in contrast to the ones in line 26 and 27, these variables can have a different value in each row and column, i.e. at each node; hence, and x and a z index are required

note that in the case of variables that change with each time step, e.g. W , the old values is overwritten; it is therefore not necessary to allocate computer memory for these variables for each time step; it is sufficient to allocate it for just $nnx \cdot nnz$ -times the variable

- 33-39 loop to compute the distance between adjacent nodes in each row (for $x = 0$ to nnx) and the distance of each node from the left boundary node; all nodes are placed in the middle of the columns
- 33 sets the initial total distance (sdx) equal to 0
- 34 begin of the loop
- 35 reads the widths of the column ($dx(x)$)
- 36 computes the distance from the node on the left boundary to the node in question ($f(x)$)
- 37 computes the distance from the node on the left boundary to the right end of the column x (sdx)
- 38 computes the distance between two adjacent nodes ($ddx(x)$); this process starts from the first node onwards ($x > 0$)
- 39 end of the loop
- 41-47 analogous to line 33-39 for columns
- 49-53 loop to read the parameter $a(x,z)$ for each node (line 51), which is needed to relate water content to matric potential (e.g. line 79)
- 55-60 loop to read the parameter $b(x,z)$ for each node (line 57), which is needed to relate water content to matric potential (e.g. line 79), and to calculate the parameter $m(x,z)$ for each node (line 58), which is needed to compute the unsaturated hydraulic conductivity (e.g. line 81)
- 62-66 loop to read the saturated water content ($Ws(x,z)$) at each node (line 64)
- 68-72 loop to read the saturated hydraulic conductivity ($Ks(x,z)$) at each node (line 70)
- 74-83 loop to read the initial water content and to compute the initial values for various water potentials and hydraulic conductivity at each node (initial means at time $t = 0$)
- 74 begin of the outer loop to proceed row by row
- 75 begin of the inner loop to proceed column by column
- 76 reads the initial water content at each node ($Wo(x,z)$)
- 77 sets the water content at each node at time $t = 0$ ($W(x,z)$) equal to $Wo(x,z)$
- 78 computes the air entry potential at each node ($Pe(x,z)$)
- 79 computes the matric potential at each node ($Pm(x,z)$)
- 80 computes the total water potential at each node ($P(x,z)$)
- 81 computes the hydraulic conductivity at each node ($K(x,z)$)

- 82 end of the inner loop
- 83 end of the outer loop
- 85-89 loop to set the matric potential, total water potential and hydraulic conductivity at the nodes in the ditch for the duration of infiltration, i.e. for $t \leq t_i$
- 85 begin of the loop
- 86 sets the matric potential at each node in the ditch ($P_m(1,z)$) equal to 0
- 87 sets the total water potential at each node in the ditch ($P(1,z)$) equal to 0
- 88 sets the hydraulic conductivity at each node in the ditch ($K(1,z)$) equal to the saturated hydraulic conductivity at the respective node
- 89 end of the loop
- 91-97 loop to tally the volume of water held in the soil region of interest at time $t = 0$ (SWold)
- 91 to start with the variable SWold is set equal to 0
- 92 begin of the outer loop to proceed row by row
- 93 begin of the inner loop to proceed column by column
- 94 if the programme is at a node which is inside the ditch (i.e. $x = 1$ and $z \leq n_s$), it jumps to the mark 10 which is in line 96 and continues there, because the ditch is not part of the soil region of interest
- 95 multiplies the water content at a node ($W(x,z)$) with the volume of the node ($dx(x) \cdot dy \cdot dz(z)$) to get the volume of water held in that node; this is then added to the volume of water already tallied for the previous nodes (SWold)
- note that dy (the thickness of the grid) does not appear in the programme, because it is assumed to be equal to 1 cm at all nodes
- 96 end of the inner loop
- 97 end of the outer loop
- 99 closes the input file (f\$)
- 102-175 computation section
- 104 sets the sum of the changes in the volume of water in the soil region of interest (S_dSW) equal to 0, because there was no change yet
- 106 sets the print time counter (count) equal to 0
- 107 sets the counter for the number of iterations carried out (nit) equal to 0
- 109-169 computation loop
- 109 begin of the time loop
- 110 prints the current time (t) on the computer screen so that one can see if the programme is running
- 112 increases the print time counter (count) by dt

172

- 113 increases the counter for the number of iterations (nit) by 1
- 115-150 Jacobi iteration
- 115 begin of the outer loop to proceed row by row
- 116 begin of the inner loop to proceed column by column
- 117 if the programme is at a node which is inside the ditch (i.e. $x = 1$ and $z \leq ns$), it jumps to the mark 20 which is in line 149 and continues there, because P_m , P and K for the nodes inside the ditch are not altered as long as there is infiltration from the ditch into the surrounding soil
- 119 determines the horizontal hydraulic conductivity for the flow going into a node (K_{inx})
- 120 determines the horizontal hydraulic conductivity for the flow going out of a node (K_{outx})
- 121 determines the vertical hydraulic conductivity for the flow going into a node (K_{inz})
- 122 determines the vertical hydraulic conductivity for the flow going out of a node (K_{outz})
- 124 the left hand side of the grid is a no flow boundary, which means that no water is allowed to flow from the nodes at $x = 0$ to the nodes at $x = 1$; to achieve this the value for K_{inx} into the nodes at $x = 1$ is set equal to 0
- 125 the right hand side of the grid is a no flow boundary as well, which means that no water is allowed to flow from the nodes at $x = nx$ to the nodes at $x = nx+1$; to achieve this the value for K_{outx} out of the nodes at $x = nx$ is set equal to 0
- 127-129 changes the conditions in the ditch and at the soil surface after the end of infiltration
- 127 for a certain time ($t \leq t_i$) water infiltrates from the soil surface ($z = 0$) into the soil layer below ($z = 1$); after this time ($t > t_i$) there is no more infiltration from the top; to model this the vertical hydraulic conductivity for the flow going into the nodes below the soil surface (K_{inz}) is set equal to 0
- 128 for a certain time ($t \leq t_i$) water also infiltrates horizontally from the ditch ($x = 1$) into the soil to the right of it ($x = 2$); after this time ($t > t_i$) there is no more horizontal infiltration from the ditch; to model this the horizontal hydraulic conductivity for the flow going into the nodes to the right of the ditch (K_{inx}) is set equal to 0; note that the ditch is only ns nodes deep so that this is only done for the $z \leq ns$
- 129 for a certain time ($t \leq t_i$) water also infiltrates vertically from the ditch ($x = 1$) into the soil layer below it ($z = ns+1$); after this time ($t > t_i$) there is no more vertical infiltration from the ditch; to model this the vertical hydraulic conductivity for the flow going into the node below the ditch (K_{inz}) is set equal to 0
- 131-134 computes the variables K_1 , K_2 , K_3 and K_4 which are required to test if the Jacobi iteration leads to a stable solution (line 139-142), and to compute the new soil water content at a node (lines 144, 145 and 147)

- 136 from the ditch to an adjacent node in the soil, water travels only part of the horizontal distance through soil, namely $dx(x)/2$; this line takes this into account
- 137 analogous to line 128, but for the vertical distance
- 139-142 the Jacobi iteration only leads to a stable solution, if the values of K_1 , K_2 , K_3 and K_4 are < 0.25 ; if this is not the case, then the variable which does not fulfil this condition is printed, as well as the node (x,z) where and the time (t) when this occurred; since these four variables include a conductivity which may change after every time step, this stability check is carried out in each time step
- 144 computes the intermediate variable f_k which is needed in line 147
- 145 computes the intermediate variable PP which is needed in line 147
- 147 computes the new water content at each node $(W(x,z))$ after the present time step
- 148 during infiltration it can happen occasionally that at a node, particularly near the soil surface or the ditch, the computed new water content slightly exceeds the saturated water content for this node; in this case the programme sets the new water content $(W(x,z))$ at this node equal to its saturated water content $(W_s(x,z))$
- 149 end of the inner loop
- 150 end of the outer loop
- 152-162 loop to tally the volume of water in the soil region of interest (SW) , and to compute the new matric potential, total water potential and hydraulic conductivity
- 152 to start with the variable SW is set equal to 0
- 153 begin of the outer loop to proceed row by row
- 154 begin of the inner loop to proceed column by column
- 155 if the programme is at a node which is inside the ditch (i.e. $x = 1$ and $z \leq ns$), it jumps to the mark 30 which is in line 161 and continues there, because the ditch is not part of the soil region of interest
- 156 multiplies the water content at a node $(W(x,z))$ with the volume of the node $(dx(x) \cdot dy \cdot dz(z))$ to get the volume of water held in that node; this is then added to the volume of water already tallied for the previous nodes (SW)
- note that dy (the thickness of the grid) does not appear in the programme, because it is assumed to be equal to 1 cm at all nodes
- 158 computes the new matric potential $(P_m(x,z))$ using the new water content $(W_s(x,z))$
- 159 computes the new total water potential $(P(x,z))$ using the new matric potential $(P_m(x,z))$
- 160 computes the new hydraulic conductivity $(K(x,z))$ using the new water content $(W_s(x,z))$
- 161 end of the inner loop
- 162 end of the outer loop

174

164 computes the difference in the volume of water held in the system (dSW) between the current (SW) and the previous time step ($SWold$)

165 computes the sum of the changes in the volume of water in the soil region of interest ($SdSW$) up to the current time t

166 turns the current volume of water in the soil region of interest (SW) into the old volume ($SWold$) for the next time step

168 checks, if the time for printing the results of the computations into the output file (tpr) has been reached; if so, the programme executes the subroutine "fprt" which begins in line 180

169 end of the computation loop, the programme returns to line 109 and executes the computations for the next time step; this loop continues until $t > tend$; the programme then moves on to line 171

171 prints the word "finished" on the computer screen to indicate that the programme is finished

173 closes the output file ($g\$$)

175 end of the main programme

178-207 output subroutine section

note that the code for subroutines must be written outside the main programme

180 gives the name of the subroutine (fprt)

181 prints the first part of the stated heading into the output file (PRINT #2); the value of time t is printed right next to it as an integer ($int(t)$), followed by the second part of the heading

182 prints the number of iterations (nit) into the output file

183 prints a blank line into the output file

185-188 prints the distance of the nodes from the left side of the grid

185 prints three blank spaces into the output file to place the distances properly above the water content matrix (line 192-198)

186 begin of the loop

187 prints the distance ($f(x) - dx(1)$) into the output file; the semicolon effects that all distances are written into the same line; the " ### " means that a blank space is printed first, then the distance for which 3 spaces (###) are reserved, followed by another blank space; the blank spaces separate the numbers in the horizontal direction

188 end of the loop

190 the first PRINT #2 effects that printing moves to a new line, the second one prints a blank line

192-198 prints the water content matrix

192 begin of the outer loop to proceed row by row

193 prints the distance of the nodes in this row from the soil surface ($g(z)$)

194 begin of the inner loop to proceed column by column

195 prints the water content ($W(x,z)$) at each node to three decimal places (".### "), followed by a blank space

196 end of the inner loop

197 analogous to line 190

198 end of the outer loop

200 prints the current value of SW

201 prints the current value of dSW

202 prints the current value of SdSW

203 analogous to line 190

205 resets the print time counter (count) to 0

207 end of the subroutine fprt; the programme now returns the line following the one from where it jumped to the subroutine, i.e. to line 169