

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

Erosão Hídrica e Infiltração de Água no Solo em
Sistemas de Cultivo, sob Chuva Simulada

Wilk Sampaio de Almeida

2015



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

EROSÃO HÍDRICA E INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM
SISTEMAS DE CULTIVO, SOB CHUVA SIMULADA

WILK SAMPAIO DE ALMEIDA

Sob orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

e Co-orientação do Professor
Elói Panachuki

Dissertação submetida como
requisito parcial para obtenção do
grau de **Mestre**, no Curso de Pós-
Graduação em Agronomia, Área de
Concentração em Ciência do Solo

Seropédica – RJ
Fevereiro de 2015

631.43
A447e
T

Almeida, Wilk Sampaio de, 1989-

Erosão hídrica e infiltração de água no solo em sistemas de cultivo, sob chuva simulada / Wilk Sampaio de Almeida – 2015.
53 f.: il.

Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo.

Bibliografia: f. 48-53.

1. Ciência do solo – Teses. 2. Solos – Erosão – Teses. 3. Solos – Manejo – Teses. 4. Cobertura dos solos – Teses. 5. Cobertura morta (Agricultura) – Teses. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

WILK SAMPAIO DE ALMEIDA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/02/2014.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Teodorico Alves Sobrinho. Dr. UFMS

Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

*O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquenta e esfria,
aperta,
daí afrouxa, sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.
(João Guimarães Rosa)*

*Vô corrê trecho
Vô percurá u'a terra preu podê trabaiá
Prá vê se dêxo
Essa minha pobre terra véia discansá
Foi na Monarca a primeira dirrubada
Dêrna d'intão é sol é fogo é táí d'inxada...*

*...É duro môço êsse mosquêro na cozinha
A corda pura e a cuia sem um grão de farinha
A bença Afiloteus
Te dêxo intregue nas guarda de Deus
Nocença ai sôdade viu
Pai volta prá curva do rio...*

(Trechos da música Curvas do Rio, de Elomar Figueira Melo)

A meus pais

*Joaquim José de Almeida (in memoriam)
e Maria Aparecida Nunes Sampaio*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo sopro de vida, sabedoria para trilhar o caminho e por sempre persistir.

Ao Prof. Dr. Daniel Fonseca de Carvalho por toda confiança, respeito, valiosa orientação e amizade, desde que cheguei à Universidade Rural. Também à sua família pelos diversos momentos compartilhados nos últimos sete anos.

Ao Prof. Dr. Elói Panachuki e família pela dedicada orientação, confiança, respeito, convivência e por todo o apoio, fundamental para a realização desta pesquisa e, além disso, por tornar-se um grande amigo.

Ao Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho pelo auxílio no ajuste dos dados de infiltração de água no solo e pelo empréstimo de material para execução da parte prática deste estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), minha casa dos últimos setes anos e pelos outros quatro que estão por vir. Aos funcionários (professores e técnicos administrativos) do Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (CPGA - CS) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Aquidauana (UUA/UEMS) e aos seus funcionários, sobretudo Alex, Alan e Luiz pelo auxílio na área experimental.

Aos colegas do Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e da Água da UEMS, os mestres Wander Valim, Pedro Nagel e Tércio Fehlauer e aos discentes bolsistas de iniciação científica Sônia Armbrust, Rodrigo Marques, Roniedison Menezes, Carlos Souza, Jéssica Souza e Israel Oliveira, pela colaboração no desenvolvimento do experimento na Unidade Universitária de Aquidauana (UUA/UEMS).

Aos integrantes (atuais e ex) do Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas (GPASSA/UFRRJ), por nos ensinar e trabalhar em equipe e que a união faz a força.

À pesquisadora da Embrapa Agrobiologia, Janaína Ribeiro Costa Rouws pelo auxílio na análise estatística dos dados.

À minha família: Cristiane, Rayla, Claudemir, Joaquim (*in memoriam*), em especial à minha mãe Maria, que sempre me incentivou nos estudos. Também à minha namorada Rosi.

À professora Lúcia Helena Cunha dos Anjos pela correção final da dissertação.

Aos colegas de mestrado do CPGA – CS, sobretudo Bárbara Zóffoli, Elias Costa e Livia Pian.

Aos colegas do alojamento da Embrapa Agrobiologia pela convivência nos últimos dois anos.

Ainda a todos aqueles que acreditam na beleza de seus sonhos e, por meio do trabalho honesto concretizam seus objetivos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo auxílio financeiro do projeto e por todas as bolsas concedidas desde 2010.

RESUMO GERAL

ALMEIDA, Wilk Sampaio de. **Erosão hídrica e infiltração de água no solo em sistemas de cultivo, sob chuva simulada**. 2015. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

As práticas inadequadas de manejo do solo associadas à condição de solo descoberto são os principais fatores que intensificam a erosão hídrica em países de clima tropical como o Brasil. Neste estudo foram avaliadas perdas de solo e de água, o índice de cobertura vegetal, a infiltração de água no solo e o ajuste dos modelos Kostiakov-Lewis, Horton e Philip para estimativa da taxa de infiltração de água no solo em quatro sistemas de cultivo em um Argissolo Vermelho distrófico. Os sistemas estudados foram solo exposto ou descoberto (SE), soja cultivada sob preparo convencional do solo (PC), soja cultivada sob plantio direto (PD) e pastagem estabelecida sem pisoteio animal (PA) em seis épocas. A cada 20 dias a partir da semeadura da cultura da soja foram tomadas fotografias digitais para estimativa do índice de cobertura do solo e também simuladas chuvas nas parcelas em campo com o infiltrômetro de aspersão portátil (InfiAsper) calibrado para aplicar intensidade de precipitação de 60 mm h^{-1} . As perdas de solo variaram de 3,10 a 11,40 e 0,03 a 0,19 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no SE e PA, água de 300,60 a 555 e 62,8 a 229,4 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no SE e PD, respectivamente. As perdas de solo diminuíram com o aumento do índice de cobertura vegetal, que em PA teve valor máximo de 98,1%. O efeito inicial do preparo convencional do solo nos sistemas de cultivo é temporário, o que os torna susceptíveis ao processo erosivo. Os modelos foram ajustados com os dados de volume de água infiltrada por intervalo de tempo correspondente. No sistema PD foi obtida maior taxa de infiltração estável (TIE). Não há diferença na TIE do SE e PC. O melhor ajuste verificado é para o modelo de Horton em sistemas com cobertura vegetal sem revolvimento do solo.

Palavras chave: Sistemas de cultivo. Preparo do solo. Rugosidade superficial do solo.

GENERAL ABSTRACT

ALMEIDA, Wilk Sampaio de. **Hidric erosion and water infiltration into the soil in cropping systems, under simulated rainfall**. 2015. 53p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

Inadequate soil management practices associated with bare soil are the main factors that promote hidric erosion in tropical countries such as Brazil. In this study were evaluated soil and water losses, vegetation index, water infiltration into the soil and the adjusted Kostiakov-Lewis, Horton and Philip models to estimate soil water infiltration rate in four cropping systems on a Red Ultisol. The systems studied were exposed or bare soil (SE), soybeans grown under conventional tillage (PC), soybean grown under no-tillage (NT) and established pasture without cattle trampling (PA) in six seasons. Every 20 days after the soybean's sowing digital photographs were taken to estimate soil coverage ratio. Also, simulated rainfall at the parcels was measured using a portable sprinkler infiltrometer (InfiAsper) calibrated to apply intensity of rainfall of 60 mm h^{-1} . Soil losses ranged from 3.10 to 11.40 and 0.03 to 0.19 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in the SE and PA, while water oscillated from 300.60 to 555 and 62.8 to 229.4 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in the SE and PD, respectively. Soil losses decreased with increasing vegetation cover ratio, which at the PA had a maximum value of 98.1%. The initial effect of soil under conventional tillage in cropping systems is temporary, which makes them susceptible to erosion. The models were adjusted using the volume of water that was infiltrated during the corresponding time interval. In the PD system was obtained the highest infiltration rate (TIE). There was no difference between the SE and PC TIE. The best fit found is for the Horton's model in systems with vegetal cover and without soil tillage.

Key words: Cropping systems. Soil tillage. Soil surface roughness.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Vista geral do simulador de chuvas InfiAsper. (Foto Wilk Sampaio de Almeida). 13
- Figura 2.** Imagens digitais tomadas para cálculo da rugosidade da superfície do solo (A, B) e rugosímetro de varetas posicionado em parcela padrão de perda de solo para obtenção de fotografias (C). (Fotos Prof. Elói Panachuki). 14
- Figura 3.** Distribuição dos eventos pluviométricos (naturais e simulados, mm) e suas respectivas erosividades ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) no período de 14/11/2013 a 01/05/2014, na área experimental em Aquidauana - MS. 17
- Figura 4.** Representação do padrão de escoamento superficial (A, B) ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e da geração de sedimentos (C, D) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) correspondente ao tempo de um teste, respectivamente aos 20 e 100 DAS nos sistemas avaliados. 18
- Figura 5.** Perdas de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) para os quatro sistemas de cultivo por época estudada em área de Argissolo Vermelho Distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 21
- Figura 6.** Tempo para o início de escoamento em superfície (min) em área de Argissolo Vermelho Distrófico sob diferentes sistemas de cultivo. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 21
- Figura 7.** Representação das lâminas escoadas ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) para os quatro sistemas de cultivo por época estudada em área de Argissolo Vermelho distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 25
- Figura 8.** Imagens digitais (A, C, E, G) e binárias (B, D, F, H) para estimativa do índice de cobertura vegetal aos 20 dias após a semeadura da cultura da soja (DAS). 26
- Figura 9.** Índice de cobertura vegetal (%) nos sistemas de cultivo por época de avaliação em área de Argissolo Vermelho distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 27
- Figura 10.** Padrão de variação das taxas de infiltração de água no solo (mm h^{-1}) ao longo do tempo avaliado (min) nos tratamentos SE (A, B) e PC, respectivamente aos 20 e 100 DAS. 36
- Figura 11.** Padrão de variação das taxas de infiltração de água no solo (mm h^{-1}) ao longo do tempo avaliado (min) nos tratamentos PD (A, B) e PA (C, D), respectivamente aos 20 e 100 DAS. 37
- Figura 12.** Taxa de infiltração inicial (i_0) de água no solo (mm h^{-1}) ao longo das épocas avaliadas (dias após a semeadura da soja - DAS) nos quatro sistemas de cultivo em Argissolo Vermelho distrófico para os sistemas e épocas avaliadas. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 43
- Figura 13.** Taxa de infiltração estável (i_f) de água no solo (mm h^{-1}) ao longo das épocas avaliadas (dias após a semeadura da soja - DAS) nos quatro sistemas de cultivo em Argissolo Vermelho distrófico para os sistemas e épocas avaliadas. (Skott-Knott, $p < 0,05$). 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Rugosidade da superfície do solo ao acaso (RR, em mm) por tratamento e por época estudada	19
Tabela 2. Valores médios dos atributos físicos das camadas do Argissolo Vermelho distrófico da área experimental	23
Tabela 3. Valores médios de umidade do solo antecedente aos testes em campo.....	24
Tabela 4. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema solo exposto	39
Tabela 5. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema soja sob preparo convencional do solo	40
Tabela 6. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema soja sob plantio direto	41
Tabela 7. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema pastagem sem pisoteio animal	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Erosão Hídrica.....	2
2.2 Erosão Hídrica sob Chuva Simulada.....	2
2.3 Infiltração de Água no Solo	3
2.4 Avaliação de Perda de Solo e de Água	5
2.5 Rugosidade Superficial do Solo	5
2.6 Atributos Físicos do Solo	6
3. CAPÍTULO I.....	8
EFEITO DO ÍNDICE DE COBERTURA VEGETAL NA EROSIÃO HÍDRICA DO SOLO SOB CHUVA SIMULADA EM SISTEMAS DE CULTIVO	8
3.1 RESUMO	9
3.2 ABSTRACT	10
3.3 INTRODUÇÃO.....	11
3.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.4.1 Tratamentos Avaliados.....	12
3.4.2 Avaliação da Rugosidade Superficial do Solo	13
3.4.3 Avaliação das Perdas de Solo e de Água	14
3.4.4 Avaliação dos Atributos Físicos do Solo	15
3.4.5 Análise do Índice de Cobertura Vegetal	15
3.4.6 Análise dos Dados	16
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.5.1 Caracterização das Precipitações	17
3.5.2 Perdas de Água e de Solo	17
3.5.3 Taxa de Cobertura Vegetal.....	25
3.6 CONCLUSÕES	28
4. CAPÍTULO II.....	29
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMAS DE CULTIVO E MODELOS PARA ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO, SOB CHUVA SIMULADA	29
4.1 RESUMO	30
4.2 ABSTRACT	31
4.3 INTRODUÇÃO.....	32
4.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.4.1 Delineamento e Tratamentos Avaliados	33
4.4.2 Avaliação da Infiltração da Água no Solo	33
4.4.4 Análise dos Dados	35
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.5.1 Taxa de Infiltração de Água no Solo.....	36
4.6 CONCLUSÕES	46
5. CONCLUSÕES GERAIS	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO GERAL

A erosão geológica é um processo de perda de solo causado por fatores naturais. Contudo, devido à interferência antrópica este processo se torna acelerado, o que é denominado erosão acelerada ou antrópica. Portanto, para que haja manutenção dos recursos ambientais e da produtividade das culturas nos sistemas agrícolas é necessário entender como ocorre e quais fatores interferem no desgaste do solo. Esse desgaste ocasiona redução da produtividade do solo pelo transporte de partículas de solo, fertilizantes e agrotóxicos, que podem reduzir a qualidade de águas fluviais para uso doméstico e dessedentação animal.

Dentre as formas de degradação do solo no Brasil, a erosão hídrica é a principal causa do depauperamento dos solos, sobretudo por práticas inadequadas de manejo que alteram prejudicialmente os atributos físicos, químicos e biológicos. Além da redução destes atributos, a erosão do solo provoca perdas econômicas, sendo gastos, em todo mundo, milhões de dólares por ano em decorrência da erosão. Sabe-se ainda que, em termos globais, há cerca de 1,094 milhões de hectares de áreas propensas a erosão pela água (Lal et al., 2011).

Assim, por meio do conhecimento das taxas de infiltração de água no solo, sua alteração e seu valor estabilizado (final) associado a modelos empíricos de estimativa da infiltração de água no solo é possível realizar o planejamento do manejo de sistemas de drenagem, irrigação e conservação do solo e da água nos diferentes sistemas de cultivo agrícola e tipos de manejo do solo.

Dentre as maneiras utilizadas para quantificar as taxas anuais de erosão hídrica existem os modelos matemáticos de simulação do processo hídrico erosivo. Destes, o de maior uso no mundo é a USLE (Universal Soil Loss Equation). Originalmente, alguns parâmetros deste modelo foram obtidos a partir da coleta e quantificação das perdas de solo e de água e dados diários de chuva natural em parcelas experimentais, consideradas parcelas padrão. Entretanto, esses dados são de difícil obtenção em campo, além da grande demanda de tempo para compor séries históricas. Frente à essa limitação, o uso dos simuladores de chuvas ou infiltrômetros de aspersão tem possibilitado de maneira prática e rápida a determinação de valores de perdas de solo e de água e da infiltração da água no solo em diversos sistemas agrícolas de cultivo.

No estado de Mato Grosso do Sul, região centro - oeste do Brasil, o aumento da área cultivada com a cultura de soja sob preparo convencional do solo é cada vez maior, além da área de pastagem cultivada devido ao rebanho bovino. Contudo sabe-se pouco sobre o padrão de variação do processo erosivo e como este intervém nas propriedades físicas do solo nos diferentes manejos e tipos de cobertura.

A hipótese desta pesquisa é que o uso de diferentes coberturas vegetais do solo associadas às práticas de cultivo afetam de maneira distinta o processo erosivo do solo em áreas de produção agrícola. Portanto, objetivou-se estudar a erosão hídrica sob chuva simulada em Argissolo Vermelho distrófico típico formado a partir de arenitos da Formação Aquidauana e submetido ao cultivo de soja (plantio direto e preparo convencional do solo), pastagem estabelecida sem pisoteio animal e solo exposto ou descoberto com preparo convencional no sentido do declive.

No Capítulo I foram estudadas as perdas de solo e de água e o percentual de cobertura do solo e a interação destes com os atributos físicos do solo nos referidos sistemas ao longo do ciclo fenológico da cultura da soja. No Capítulo II foi determinada a infiltração de água no solo para os sistemas de cultivo ao longo do ciclo fenológico da soja, além da análise de adequação dos modelos de Horton, Kostiakov-Lewis e Philip para a estimativa da taxa de infiltração de água no solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Erosão Hídrica

A degradação dos solos influencia diversas regiões do mundo e constitui fenômeno de grande relevância, em razão da rapidez com que se processa e pelos prejuízos acarretados para diversas atividades econômicas e para o meio ambiente. A forma mais ativa do processo de degradação dos solos em países de clima tropical é a erosão hídrica, que é a combinação dos processos de desagregação, transporte e deposição de partículas do solo, decorrentes do impacto da gota de chuva e do escoamento da água na superfície do solo.

Os principais fatores da erosão hídrica estão relacionados ao clima, ao solo, ao relevo, à cobertura vegetal, ao uso do solo e às práticas conservacionistas (Wischmeier & Smith, 1978). O impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo constitui o ponto inicial da erosão hídrica. Em regiões com elevados valores de erosividade associados à superfície do solo desprovida de cobertura vegetal pode ocorrer intensa degradação com consequentes perdas de solo, água e nutrientes. A magnitude do processo erosivo depende fundamentalmente da combinação da capacidade da chuva de causar erosão, erosividade, e da capacidade do solo em resistir a essa ação erosiva, definida como erodibilidade. A erodibilidade representa a suscetibilidade do solo ao processo erosivo e pode ser determinada de forma direta por meio da razão entre as perdas de solo e a erosividade das chuvas (Wischmeier & Smith, 1978), sob chuva natural ou chuva simulada (Carvalho et al., 2010), e também por meio de análise de regressão linear simples entre essas duas variáveis.

As operações de preparo do terreno interferem no potencial de erosão do solo das áreas cultivadas, pois alteram o microrrelevo e a cobertura por resíduos vegetais de sua camada superficial, promovendo a exposição da superfície do solo à ação erosiva da chuva (Panachuki et al., 2010).

A erosão hídrica tem sido uma das principais causas de redução da produtividade das terras agrícolas, podendo, inclusive, resultar no abandono de áreas anteriormente produtivas (Castro et al., 2012). Além das partículas de solo em suspensão são transportados nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas por meio do escoamento superficial. Isto resulta no empobrecimento gradativo dos solos agrícolas, gerando assoreamento e poluição de mananciais hídricos. Os nutrientes são transportados na solução do solo e/ou adsorvidos às partículas deste.

Diversos estudos são realizados com sistemas de manejo conservacionistas (Cogo et al., 1984; Panachuki et al., 2010; Machado et al., 2013), que promovam pequena ou nenhuma movimentação mecânica do solo, manutenção de resíduos culturais sobre a superfície e alteração da rugosidade superficial (Panachuki et al., 2011; Rosa et al., 2012), pois estes são mais eficazes no controle das perdas de solo e água por erosão hídrica quando comparados aos sistemas convencionais.

2.2 Erosão Hídrica sob Chuva Simulada

Nos estudos de manejo e conservação do solo e da água, além das parcelas de perda de solo e de água sob chuva natural, têm-se empregado os simuladores de chuva ou infiltrômetros de aspersão (Alves Sobrinho et al., 2008; Panachuki et al., 2006b). Estes equipamentos são projetados para aplicar água via aspersão de forma similar às chuvas naturais, mediante caracterização do diâmetro médio, da distribuição e da velocidade terminal das gotas para diferentes intensidades de precipitação e pressão de serviço (Carvalho et al., 2009). Os simuladores de chuva têm sido utilizados em estudos de formação de crosta superficial, selamento superficial e estudos de erosão do solo por mais de 30 anos (Abudi et

al., 2012), tendo diversas vantagens como a rapidez na obtenção dos dados em relação aos estudos com chuva natural (Alves Sobrinho et al., 2008; Abudi et al., 2012).

Por outro lado, esses equipamentos possuem algumas limitações como a pequena área de atuação, conforme descrito por Cerdà (1999), que em estudo de 229 simuladores, aproximadamente 50% tinham área menor que $1,5 \text{ m}^2$ e, ainda segundo Eltz et al. (2001) sejam incapazes de reproduzir completamente as características da chuva natural, possuem dificuldades logísticas na realização das simulações de chuva. Apesar das limitações relatadas pelos autores, o uso dos simuladores de chuva permite a obtenção de resultados precisos, o que os torna mais adequados para estudos de infiltração de água no solo e erosão hídrica em sistemas de manejo em diversos ambientes (Alves Sobrinho et al., 2008; Abudi et al., 2012), se comparados a outros métodos que superestimam a infiltração de água por não considerar o impacto das gotas de chuva no solo (Pott e De Maria, 2003).

Abudi et al. (2012) desenvolveram e avaliaram um simulador de chuvas portátil para aplicações de chuvas em campo, cujo diâmetro médio de gotas é de 1,5 mm e a energia cinética da chuva simulada é 76% da energia esperada para determinada chuva natural de mesma intensidade. Além disso, a velocidade terminal das gotas é praticamente igual à teórica, o que torna este equipamento eficiente para os ensaios de campo de infiltração, formação de crostas e erosão do solo. Outro modelo de infiltrômetro de aspersão é o InfiAsper, desenvolvido por Alves Sobrinho et al. (2002) com base na evolução do simulador de disco rotativo proposto por Morin et al. (1967). O InfiAsper pode ser calibrado para operar com intensidade de precipitação de 30 a 155 mm h^{-1} sem alteração do tipo de bico precipitador e a pressão de serviço. Possui ainda diâmetro médio de gotas e altura de queda de 2,0 mm e 2,30 m, respectivamente, energia cinética calculada equivale a mais de 90% da energia cinética da chuva natural de mesma magnitude.

O InfiAsper é portátil e de fácil utilização no campo tendo sido utilizado em diversos estudos avaliando as perdas de solo e de água em sistemas de cultivo (Silva et al., 2005; Panachuki et al., 2006a; 2010), a sua interação com diferentes condições de rugosidade superficial do solo (Panachuki et al., 2010; 2011) e as taxas de infiltração de água no solo (Alves Sobrinho et al., 2003; Panachuki et al., 2006b; Santos et al., 2014).

Portanto, o processo acelerado de erosão hídrica do solo em áreas agrícolas resulta da alteração dos atributos físicos do solo influenciada por práticas inadequadas no manejo. Sua estimativa é imprescindível para obtenção de dados e informações necessárias para o desenvolvimento de métodos e modelos que auxiliem na tomada de decisão (Alves Sobrinho et al., 2008; Abudi et al., 2012) e adoção de práticas conservacionistas nos sistemas agrícolas de cultivo.

2.3 Infiltração de Água no Solo

A infiltração de água no solo é definida como a entrada de água através da interface atmosfera-solo. Por sua vez, o termo taxa de infiltração refere-se à quantidade de água que atravessa determinada área da superfície do solo por unidade de tempo (Libardi 2005).

O processo de infiltração de água no solo é de importância prática, pois, muitas vezes, determina o balanço de água na zona das raízes e o deflúvio superficial, responsável pelo fenômeno da erosão durante precipitações pluviais (Panachuki et al., 2006b). Assim, para se realizar manejo eficiente do solo e da água em áreas agrícolas é indispensável que se conheça a taxa de infiltração, seu padrão de variação e suas relações com os atributos físicos do solo.

A taxa de infiltração pode ser considerada a propriedade que melhor reflete as condições físicas, bem como qualidade e estabilidade estrutural do solo (Panachuki et al., 2006b), por integrar vários atributos como a estabilidade de agregados, selamento superficial,

distribuição do tamanho e continuidade de poros, poros biológicos e o efeito da cobertura do solo (Reichert et al., 2009).

Durante uma chuva ou irrigação, parte da água infiltra nos horizontes superficiais do perfil do solo de forma vertical, e aumenta a umidade destes até que esta área se torne saturada. Outra parte da água tende a escoar pela superfície, o que configura o escoamento superficial (Carvalho et al., 2009). Assim, estando o solo inicialmente seco, a capacidade de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo um valor final, conhecido como capacidade de infiltração mínima (Libardi, 2005), que após ser superada inicia-se o escoamento de água na superfície do solo.

Deste modo, por ser um fenômeno de superfície, a infiltração é influenciada pelo preparo do solo, o qual exerce efeito temporário ao deixar o solo solto, aumentando a infiltração. Contudo, se o solo não estiver protegido com vegetação ou cobertura morta, a chuva e o vento, atuando em sua superfície reduzem a taxa de infiltração. A aração profunda é também fator favorável ao aumento da infiltração, enquanto práticas que exercem compressão no solo podem diminuí-la. O cultivo em contorno, retardando a enxurrada, favorece a infiltração (Bertoni e Lombardi Neto, 2012).

De maneira isolada, o fator que exerce maior efeito na taxa de infiltração é a cobertura vegetal presente sobre o solo durante a chuva. Quando ocorrem com elevada intensidade em áreas com solo exposto ou sem cobertura, as gotas de chuva promovem selamento superficial e a infiltração de água torna-se reduzida, porém quando em condições de adequada cobertura superficial o efeito é amenizado.

O processo de infiltração de água no solo pode ser descrito por diversas equações ou modelos, alguns desenvolvidos a partir de considerações físicas, enquanto outros, de forma empírica. Esses modelos possuem coeficientes que podem ser calculados a partir das equações teóricas ou serem estimados por meio de regressão a partir de dados de infiltração medidos no campo.

Dentre as equações mais utilizadas para estimativa da taxa de infiltração estão as de Horton, Kostiakov-Lewis e Philip. De acordo com Prevedello (1996) a equação de Horton, descrita na forma de função exponencial, considera que a redução na taxa de infiltração com o tempo decorre de fatores da superfície do solo, tais como selamento superficial, proveniente do impacto das gotas de chuva, fenômenos de expansão e contração do solo.

O modelo empírico de Kostiakov-Lewis é usado, sobretudo em manejo de irrigação para estimativa da infiltração acumulada (Panachuki et al., 2006b). Por sua vez, a equação teórica de Philip considera que o processo de infiltração é fortemente influenciado por propriedades físicas do solo e por ação gravitacional, principalmente no início do processo em solos com alto teor de umidade (Assouline, 2013).

A qualidade do ajuste dos modelos pode ser verificada por índices estatísticos e comparações gráficas entre os valores médios observados e os estimados. Na análise do desempenho dos modelos, é preciso analisar de maneira conjunta os diversos índices, pois determinado modelo pode se ajustar bem a dados experimentais pelo indicador do índice sem que o processo real em estudo seja bem representado. Assim, além do coeficiente de determinação (R^2), são aplicados os índices descritos por Willmott et al. (1985): erro padrão de estimativa (EPE), o coeficiente de massa residual (CMR), o coeficiente de ajuste (CA) e a eficiência (EF). Considerando as particularidades correspondentes aos índices calculados e maior restrição é possível agrupar e classificar em índice único os valores de EPE, CMR, CE e EF para fornecer resultado mais preciso. Para tanto se utiliza o método dos valores ponderados dos índices estatísticos (Vp), conforme (Thiersch, 1997).

Diversos autores estudaram o padrão de infiltração de água em diferentes solos e sistemas de cultivo com uso do simulador de chuvas InfiAsper, calibrado para aplicar diferentes intensidades de precipitação e ainda a adequação dos modelos de Horton,

Kostiakov-Lewis e Philip para estimativa da taxa de infiltração (Alves Sobrinho et al., 2003; Silva et al., 2005; Panachuki et al., 2006a; 2006b; 2010; 2011; Santos et al., 2014).

Na maioria dos estudos a equação de Horton foi mais adequada para a estimativa da taxa de infiltração de água no solo, com maiores valores do coeficiente de determinação (R^2).

2.4 Avaliação de Perda de Solo e de Água

A maioria das pesquisas sobre erosão tem por objetivo medir a influência dos diferentes fatores determinantes no processo, a fim de possibilitar estimativa de perdas de solo e selecionar práticas que as reduzam ao máximo (Eduardo et al., 2013). Nestes estudos o uso de equações empíricas tem se tornado indispensável para prever as perdas de solo e de água em determinada área de cultivo devido à operacionalidade e rapidez na obtenção dos resultados. Dentre os modelos empíricos, a USLE (Universal Soil Loss Equation), apresentada por Wischmeier & Smith (1978), tem sido o modelo mais utilizado em todo o mundo (Kinnell, 2010) devido à sua aplicabilidade e confiabilidade na predição de perda de solo (Ferro, 2010), embora o modelo apresente algumas limitações.

A USLE engloba um conjunto de fatores como a erosividade (fator R), a erodibilidade (fator K), a topografia (fatores LS), o uso e manejo do solo (fator C) e as práticas conservacionistas de suporte (fator P).

De maneira isolada, a presença da cobertura do solo por resíduos vegetais é o fator mais importante na dissipação da energia de impacto das gotas da chuva na superfície do solo, visto que ela pode evitar a desagregação de suas partículas (Panachuki et al., 2011), o que minimiza os efeitos da erosão hídrica.

Desta maneira, o fator cobertura e manejo do solo (C) representa o somatório dos produtos da razão de perda de solo (RPS) pela fração do índice de erosividade (FEI_{30}) de cada estágio da cultura de interesse para determinado estudo (Wischmeier & Smith, 1978). Esse fator varia de 0 a 1, aproximando-se de 0 nos sistemas de manejo conservacionistas, e de 1, nos não conservacionistas (Bertol et al., 2002).

Em estudo sob chuva natural com a cultura do milho cultivada em nível foi obtido valor médio do fator C de $0,0070 \text{ Mg ha Mg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, durante três anos (Eduardo et al., 2013). Os autores sugerem este valor como primeira aproximação para a região da Baixada Fluminense - RJ. No mesmo estudo o fator P médio foi de 0,45, o que indica redução de 55% na perda de solo em relação ao milho com sulcos de plantio no sentido do declive.

A erosão hídrica é influenciada por diferentes métodos de preparo do solo e maiores perdas de solo ocorrem quando o maior período erosivo coincide com a época de semeadura das culturas e início de desenvolvimento das plantas. De acordo com Panachuki et al. (2011) as operações de preparo do solo influenciam fortemente a erosão hídrica das áreas cultivadas, alterando o microrrelevo e a cobertura por resíduos vegetais e promovendo a exposição da superfície do solo à ação da chuva e da enxurrada.

Vários estudos relacionam as perdas de solo, água e nutrientes com as práticas conservacionistas objetivando a manutenção da produtividade sem prejuízos aos recursos ambientais (Silva et al., 2005; Carvalho et al., 2009; Panachuki et al., 2011; Eduardo et al., 2013; Machado et al., 2013).

2.5 Rugosidade Superficial do Solo

A rugosidade superficial do solo refere-se às variações de altura da superfície do solo, ou seja, das microelevações e da profundidade das microdepressões superficiais, bem como sua distribuição espacial (Kuipers, 1957; Allmaras et al., 1966).

Diversos fatores relacionados com as práticas de manejo do solo e com as propriedades físicas do solo influenciam a sua rugosidade superficial. Dentre esses fatores, o

preparo do solo, a cobertura do solo pelos resíduos vegetais, as precipitações pluviiais, o teor de água do solo antecedente ao seu preparo, a porosidade, a granulometria e a estrutura do solo exercem maior influência (Allmaras et al., 1967; Bertol et al., 2006).

A rugosidade superficial do solo pode ser classificada considerando-se dois tipos: rugosidade orientada (tortuosidade - T) e rugosidade ao acaso (RR). A rugosidade orientada caracteriza-se por sulcos e elevações formadas por implementos utilizados nas práticas agrícolas e pela ação da enxurrada. Por sua vez, a rugosidade ao acaso expõe a distribuição casual dos picos e depressões da superfície do solo, não permitindo a identificação do tipo e da direção do preparo executado (Burwell et al., 1963).

O conhecimento da dinâmica do microrrelevo é essencial para melhor compreensão da erosão do solo, pois os principais processos relacionados à erosão hídrica, como o armazenamento da água em depressões do solo, desprendimento de partículas do solo e transporte de sedimentos ocorrem inicialmente em pequena escala, influenciados pela dinâmica do microrrelevo (Rosa et al., 2012), além do uso desse índice em modelos matemáticos de predição da erosão hídrica.

Alguns autores afirmam que a capacidade de armazenamento de água da superfície do solo depende quase exclusivamente da rugosidade superficial do mesmo (Cogo, 1981; Kamphorst et al., 2000; Alvarez-Mozos, 2011), visto que a rugosidade diminui a velocidade do escoamento superficial, permite a deposição de partículas desagregadas, cria poças de água, e assim, protege o solo da desagregação pelo impacto direto das gotas de chuva (Cogo et al., 1984).

As depressões na superfície do solo ocasionadas pela rugosidade promovem retardamento no início do escoamento superficial em decorrência da formação das poças de água, visto que só haverá escoamento a partir do momento em que a capacidade de armazenamento de água dessas depressões for superada. A formação de poças pode, ainda, aumentar o gradiente hidráulico sobre a superfície, favorecendo a infiltração de água no solo (Darboux & Huang, 2005).

No Brasil ainda são poucos os estudos sobre a influência da rugosidade da superfície do solo e sua variação temporal no processo erosivo. Panachuki et al. (2010) também relataram que no estado de Mato Grosso do Sul também foram feitos poucos estudos dessa natureza, sobretudo quanto às alterações da rugosidade decorrentes das operações de preparo do solo, das quantidades e tipos de resíduos vegetais dispostos em sua superfície do solo, bem como pela ação das chuvas.

2.6 Atributos Físicos do Solo

Os diferentes tipos de manejo e sistemas de cultivo alteram as propriedades físicas do solo, o que pode influenciar de maneira distinta o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas nos sistemas agrícolas de produção. Segundo Carpenedo & Mielniczuk (1990), algumas práticas de manejo do solo alteram principalmente a estrutura do solo, podendo tais alterações ser permanentes ou temporárias e, ainda, influenciarem o processo erosivo.

Dessa maneira, o solo submetido ao cultivo intensivo tem a sua estrutura original alterada com fracionamento dos agregados em unidades menores, conseqüente redução no volume de macroporos e aumento no volume de microporos e na densidade do solo (Panachuki et al., 2006a).

Os sistemas de manejo agrícola também afetam as propriedades hidráulicas do solo e seus processos de forma dinâmica no espaço e no tempo, com conseqüências para o armazenamento e movimentação de água, nutrientes, poluentes, e para o crescimento da planta (Strudley et al., 2008).

Hernani et al. (1997) avaliando o efeito de sistemas de preparo na erosão de um Latossolo Roxo de Dourados, MS concluíram que o plantio direto foi o sistema mais eficiente no controle de perdas de solo e de água. As perdas médias de solo relativas aos sistemas de plantio direto, escarificação e gradagem niveladora, gradagem pesada e gradagem niveladora e aração com arado de discos e duas gradagens niveladoras, sem cobertura vegetal foram, 0,8; 2,8; 5,3; 7,3 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Para Panachuki et al. (2006a) estudos como o de Hernani et al. (1997) são de difícil condução em outras condições de solo e manejo por terem sido feitos com parcelas fixas e com chuva natural. De maneira semelhante ao estudo de Hernani et al. (1997), Schick et al. (2000) compararam sistemas de preparo e cultivo do solo, e concluíram que o sistema plantio direto é mais eficaz no controle das perdas de solo, reduzindo-as em 68 e 52%, em relação ao manejo com uma aração associada a duas gradagens e escarificação associada a uma gradagem, respectivamente. As perdas de água seguem a mesma tendência, sendo menos influenciadas que as perdas de solo.

Silva et al. (2005) observaram em sistema de preparo convencional tendência de maiores valores para a densidade do solo, na camada correspondente à profundidade de 0,225 m. De outro modo, no plantio direto foram observados valores maiores na camada em que o anel volumétrico foi centrado a 0,075 m de profundidade. Deste modo pode-se deduzir que, no preparo convencional, a camada compactada encontra-se em maiores profundidades, isso devido ao revolvimento superficial do solo no preparo do mesmo.

No plantio direto a camada compactada em menores profundidades deve-se, provavelmente, à passagem de máquinas e à pressão que estas exercem sobre o solo. Assim, os autores relatam que no preparo convencional a porcentagem de macroporos na primeira camada de solo é superior ao plantio direto, provavelmente em razão do revolvimento do solo pelo preparo do mesmo. Ainda relataram que a microporosidade foi maior na camada mais profunda, possivelmente por translocação de partículas de solo para maiores profundidades.

Em estudo para avaliar perdas de solo e de água em pastagens e em plantio direto, em sistema de integração agricultura-pecuária sob chuva simulada Panachuki et al. (2006a) não encontraram diferenças para a densidade do solo, contudo houve tendência de menor densidade na camada mais profunda das áreas com cultivo de pastagem.

Os autores obtiveram maior macroporosidade na profundidade de 5 a 20 cm no sistema pastagem, enquanto no sistema plantio direto foi maior na profundidade de 0 a 5 cm. Assim, associaram os maiores valores de macroporosidade aos menores valores de densidade do solo, fato evidenciado por correlação negativa ($R = - 0,93$) entre esses atributos e, ainda constataram diminuição dos valores de DMG e de DMP em maiores profundidades.

Portanto, diversos autores estudaram as propriedades físicas do solo como a porosidade, a estrutura do solo, capacidade de infiltração de água e sua alteração devido às práticas de manejo do solo (Allmaras et al., 1967; Römkens & Wang, 1986; Bertol et al., 2006; Panachuki et al., 2006a) e esses atributos têm sido relacionados à rugosidade superficial do solo (Rosa et al., 2012), uma vez que esta induzida pelas operações de preparo e pelos resíduos vegetais, aumenta a retenção e infiltração de água no solo, por elevar a capacidade de armazenamento depressional de água na superfície e, com isso, diminuir o escoamento superficial (Panachuki et al., 2011).

3. CAPÍTULO I

EFEITO DO ÍNDICE DE COBERTURA VEGETAL NA EROSÃO HÍDRICA DO SOLO SOB CHUVA SIMULADA EM SISTEMAS DE CULTIVO

3.1 RESUMO

Foram avaliadas as perdas de solo e de água e o percentual de cobertura vegetal nos sistemas solo exposto (SE), soja cultivada sob preparo convencional do solo (PC), soja cultivada sob plantio direto (PD) e pastagem estabelecida sem pisoteio animal (PA) em seis épocas. A cada 20 dias foram tomadas fotografias digitais para estimativa do índice de cobertura do solo e também aplicadas chuvas nas parcelas em campo com o infiltrômetro de aspersão portátil (InfiAsper) calibrado com intensidade de precipitação de 60 mm h^{-1} . As perdas de solo variaram de 3,10 a 11,40 e 0,03 a 0,19 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no SE e PA; as de água de 300,60 a 555 e 62,8 a 229,4 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ no SE e PD, respectivamente. As perdas de solo diminuíram com o aumento do índice de cobertura vegetal, que em PA teve valor máximo de 98,1%. O efeito do revolvimento do solo sob preparo convencional nos sistemas de cultivo é temporário, o que os torna susceptíveis ao processo erosivo.

Palavras-chave: Perdas de solo e de água. Percentual de cobertura do solo. Preparo do solo.

3.2 ABSTRACT

The soil and water losses and the vegetation cover percentage were evaluated in systems exposed or bare soil (BS), soybeans grown under conventional tillage (SCT) soybeans grown under no-tillage (SNT) and without cattle trampling established pasture (PA) in six seasons. Every 20 days were taken digital photographs to estimate soil coverage ratio and also applied rains in the plots in field with portable sprinkler infiltrometer (InfiAsper) with rainfall intensity of 60 mm h^{-1} . Soil losses ranged from 3.10 to 11.40 and 0.03 to 0.19 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in the SE and PA; water from 300.6 to 555 and 62.8 to 229.4 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ in the SE and PD, respectively. Soil losses decreased with increasing vegetation cover ratio, which in PA had maximum value of 98.1%. The effect of soil conventional tillage in cropping systems is temporary, which makes them susceptible to erosion.

Key words: Soil and water losses. Ground cover percentage. Soil tillage.

3.3 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica acelerada é o processo de degradação do solo causado por interferência do homem, onde se perde qualidade hidrológica, química, biológica e física, como solo, água, nutrientes e sementes. Essas perdas estão relacionadas às práticas inadequadas de manejo associadas, em geral, ao período em que o solo permanece sem cobertura vegetal em sua superfície. Nos sistemas de cultivo o entendimento e controle dos principais agentes que originam a erosão, tais como as chuvas e os atributos do solo, estes alterados pela ação antrópica por meio de revolvimento ou não do solo minimizam o efeito do processo erosivo, uma vez que os principais agravadores desse processo são as atividades humanas.

A alteração de alguns atributos físicos do solo por práticas de manejo interferem de maneira distinta no processo erosivo de áreas submetidas a diferentes condições de cobertura vegetal e preparo do solo e, dessa maneira, o aumento do escoamento em superfície e a aceleração da geração de sedimentos, alteram o equilíbrio hidrológico natural do sistema. Os valores de solo e água perdidos são imprescindíveis ao planejamento e manejo dos sistemas produtivos de maneira conservacionista.

O preparo convencional do solo o torna mais propenso à desagregação e arraste pela ação da chuva, uma vez que o revolvimento deixa o solo mais solto e, quando este se encontra desprovido de cobertura vegetal ocorre formação do selamento superficial, uma fina camada de solo, que se torna adensada pelo impacto da gota de chuva. Por outro lado, o mesmo solo após preparo com cobertura vegetal em superfície pode perder quantidade menor de solo.

Por sua vez, áreas com pouco ou sem revolvimento do solo associadas ao uso contínuo de cobertura vegetal em superfície permitem obter produção agrícola satisfatória associada à conservação dos recursos naturais e uso da terra com escolha do sistema que melhor se adapte a cada região melhorando a eficiência das práticas agrícolas.

No estado de Mato Grosso do Sul, sistemas de plantio entendidos como conservacionistas têm sido bastante difundidos nos últimos anos. Contudo, os estudos relacionando as perdas de solo e de água nessas áreas com o percentual de cobertura do solo ainda são poucos.

Portanto, este estudo avaliou a erosão hídrica do solo e o índice de cobertura vegetal em sistema de pastagem estabelecida sem pisoteio animal, cultivo de soja em plantio direto, cultivo de soja sob preparo convencional do solo e solo exposto ou descoberto, por meio do uso de simulador de chuva.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Unidade Experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, localizada na cidade de Aquidauana, MS entre as coordenadas 20°27' S, 55°40' W e altitude média de 174 m, de novembro de 2013 a abril de 2014. O solo predominante na área é o Argissolo Vermelho Distrófico típico (Schiavo et al., 2010) com 770 g kg⁻¹ e 120 g kg⁻¹ (0-24 cm); 610 g kg⁻¹ e 250 g kg⁻¹ (50-65 cm) de areia e argila, respectivamente. O clima regional é do tipo Aw (tropical úmido) segundo a classificação de Köppen. De acordo com Santos et al. (2014) os valores médios anuais de temperatura e precipitação são, respectivamente, de 24°C e 1400 mm. O relevo regional predominante é suave ondulado, com declividade média de 0,03 m m⁻¹.

3.4.1 Tratamentos Avaliados

Os tratamentos foram caracterizados por culturas associadas a sistemas de preparo do solo: solo exposto – SE, sob preparo convencional do solo na direção do declive; soja (*Glicine max*) cultivada em sistema de preparo convencional do solo - PC, na direção do declive; soja (*Glicine max*) cultivada em sistema de plantio direto - PD; e pastagem estabelecida - PA (*Brachiaria ruziziensis*) sem pisoteio animal.

O preparo convencional do solo foi caracterizado por uma gradagem aradora, seguida de duas gradagens niveladoras/destorroadoras no dia 12/11/2013. A adubação de plantio com a formulação NPK 0-20-20 na dosagem 300 kg ha⁻¹ foi realizada no dia 27/11/2013 e a semeadura da soja cultivar SYN9074 RR em 13/12/2013.

O simulador de chuva utilizado, desenvolvido por Alves Sobrinho et al. (2008) (Figura 1), opera com dois bicos Veejet 80.150 paralelos que, posicionados a 2,30 m em relação ao nível do solo e pressão de serviço de 35,6 kPa, produz gotas com diâmetro médio de 2,0 mm. O equipamento foi calibrado para aplicar chuva com intensidade de 60 mm h⁻¹, valor este que tem sido adotado em estudos dessa natureza (Mello et al. 2003; Vahabi and Nikkami 2008; Panachuki et al. 2011; Huang et al. 2013).

A parcela teste que recebe a precipitação possui área útil de 0,70 m², sendo delimitada por chapas de aço galvanizado de forma a permitir a coleta do volume de água escoado em superfície. Os delimitadores das parcelas permaneceram fixos na área durante todo o período de avaliação correspondendo ao ciclo da cultura da soja.



Figura 1. Vista geral do simulador de chuvas InfiAsper. (Foto Wilk Sampaio de Almeida).

3.4.2 Avaliação da Rugosidade Superficial do Solo

A rugosidade da superfície do solo foi estimada com auxílio do rugosímetro de varetas conforme descrito por Panachuki et al. (2010) em três momentos nos tratamentos solo exposto e soja cultivada sob preparo convencional do solo. As avaliações foram feitas antes das operações de preparo do solo, após as operações de preparo do solo e após a sexta aplicação de chuva simulada. Nos demais tratamentos, PD e PA foram feitas apenas duas avaliações, inicial (antes da aplicação das chuvas) e final (após a aplicação das chuvas) em razão do não revolvimento do solo para este estudo (Figuras 2A e 2B).

O rugosímetro é constituído por base retangular que pode ser apoiada e nivelada na superfície do solo, além de uma barra perfurada, na qual são colocadas as 20 varetas de alumínio alinhadas e distanciadas 30 mm entre si, transversalmente em relação ao sentido do declive do terreno. Esta barra é conectada, na sua parte média, à extremidade da haste horizontal de 1,80 m de comprimento, sobre a qual é instalada, na extremidade oposta, a máquina fotográfica (Figura 2C).

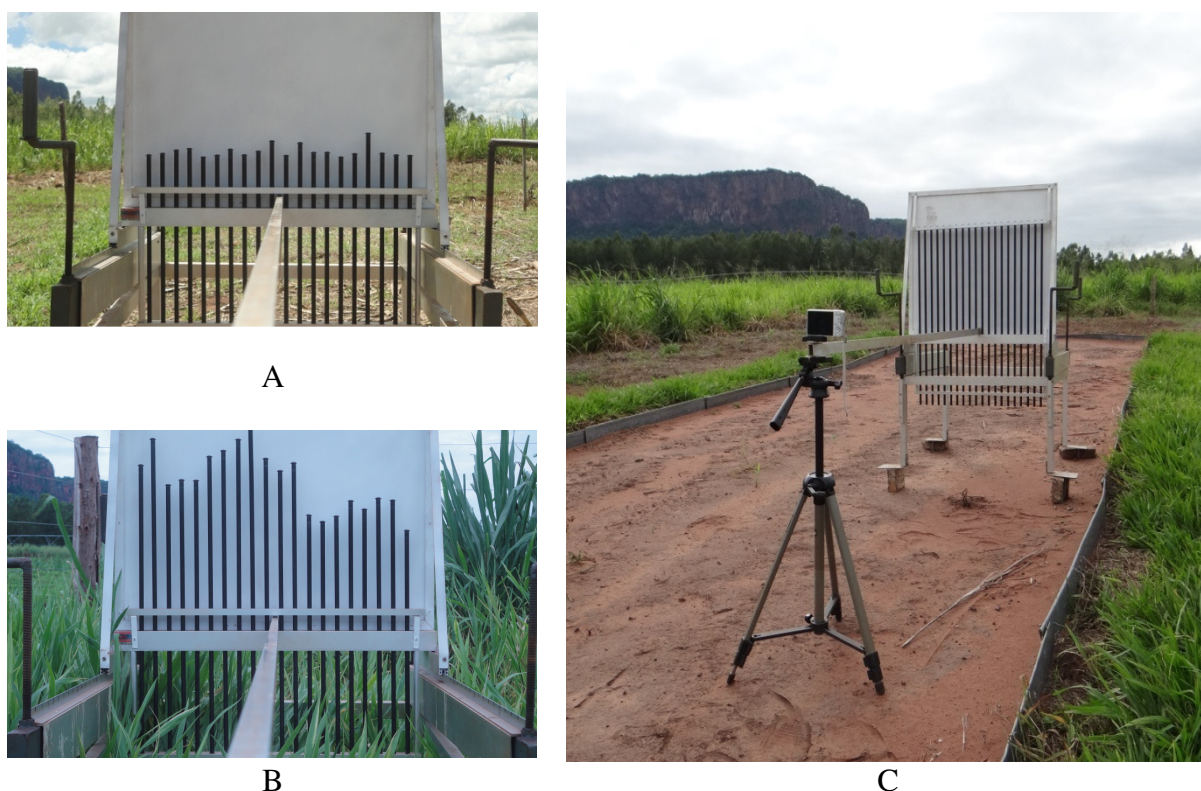


Figura 2. Imagens digitais tomadas para cálculo da rugosidade da superfície do solo (A, B) e rugosímetro de varetas posicionado em parcela padrão de perda de solo para obtenção de fotografias (C). (Fotos Prof. Elói Panachuki).

Durante a avaliação em campo, a barra foi deslocada no sentido do aclive totalizando 20 posições de medidas. Em cada posição foi tomado o registro fotográfico das 20 varetas verticais. Foi gerado um *grid* de 0,36 m² com imagens das alturas de 400 varetas para cada momento avaliado em cada parcela experimental. Com uso do programa computacional “Profile Meter Program”, proposto por Wagner & Yiming Yu (1991) e Wagner (1992), foi realizada, para cada fotografia, a avaliação da quantidade de *pixels* de cada vareta, com posterior transformação em unidades de comprimento, correspondente à altura de cada vareta. Este programa foi desenvolvido visando a obtenção de valores de rugosidade com a utilização de técnicas de análise de imagens digitalizadas. A seguir, estimou-se o índice de rugosidade ao acaso, que foi utilizado para representar a rugosidade superficial do solo em cada sistema de cultivo. O índice de rugosidade calculado consistiu do desvio padrão das 400 leituras das alturas do microrrelevo, sem transformação logarítmica e sem eliminar os valores extremos (10% superiores e 10% inferiores), conforme proposto por Kamphorst et al. (2000).

3.4.3 Avaliação das Perdas de Solo e de Água

Antes do início da simulação de chuva uniformizou-se a umidade do solo por meio do molhamento nas parcelas com uso de um sistema de gotejamento, o que constitui pré-requisito à aplicação da chuva artificial (Cogo et al., 1984). Após esta etapa foram iniciadas as avaliações de perdas de solo e água. Os testes ou ensaios de campo com o simulador tiveram, cada um, duração de 60 min a partir do início do escoamento superficial. Ao iniciar o runoff os volumes de água eram coletados durante o tempo de dois minutos e medidos. Dessa forma eram obtidas 30 amostras de volumes de água escoada, em cada ensaio com o simulador. Destes volumes, uma amostra era separada também, a cada intervalo de dois minutos para a

determinação da massa de solo em laboratório. Portanto, a perda de solo era determinada nesses volumes coletados, totalizando 30 amostras durante cada ensaio. Em laboratório adicionava-se três gotas ácido clorídrico (HCl a 37%) para proporcionar a floculação do material em suspensão e, assim, promover a separação dos sedimentos. Após a decantação dos sólidos, 24 h após adicionado a solução de HCl, parte da água era retirada com auxílio de sifão para facilitar a secagem do solo em estufa a 65 °C. Após a secagem do material, determinava-se a massa de solo nas amostras e, em seguida, a massa total do evento correspondente. A perda de água foi determinada a partir da totalização da lâmina de água escoada superficialmente, considerando as 30 amostras em cada ensaio com o simulador.

3.4.4 Avaliação dos Atributos Físicos do Solo

Em cada área experimental (0,70 m²) foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-10; 10-20 e 20-40 cm para caracterização física do solo e as análises feitas conforme Embrapa (1997). Os atributos avaliados foram: densidade, porosidade do solo e estabilidade de agregados. Para a densidade e porosidade foram coletadas amostras indeformadas usando anéis volumétricos centrados nas profundidades de 5, 15 e 30 cm. As amostras estabilidade de agregados consistiram de blocos de solo com estrutura natural, que após secos ao ar foram desagregados em subunidades e peneirados com malhas de 8,0 e 4,0 mm. Os agregados retidos na peneira de 4,0 mm foram utilizados na análise via úmida com tempo de agitação de 10 minutos em jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5 e 0,105 e 0,053 mm, conforme metodologia de Yoder (Embrapa (1997)). Deste modo, o índice de estabilidade foi caracterizado pelo diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), e os cálculos destes realizados segundo Kemper & Rosenau (1986).

A resistência do solo à penetração foi quantificada em laboratório sendo feitas três leituras por anel, nas mesmas amostras de terra coletadas para caracterizar a porosidade e a densidade. Utilizou-se um penetrógrafo digital de bancada dotado com ponteira de cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro e velocidade constante de 100 mm min⁻¹.

Ainda foram avaliadas: umidade do solo antecedente à chuva simulada, estimada pelo método gravimétrico, com coletas antes de cada teste nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-40 cm; tempo de início de escoamento superficial, considerado do início da aplicação da chuva até o momento em que se visualizava escoamento de enxurrada na calha coletora; energia cinética da precipitação artificial, estimada por meio da metodologia apresentada por Wischmeier & Smith (1978) e as equações propostas por Foster et al. (1981) e Wagner e Massambani et al. (1988), considerando a altura do bico precipitador (2,30 m), a pressão de serviço (32 kPa) e a intensidade (60 mm h⁻¹) e o tempo de precipitação, onde foi considerado o somatório do período de aplicação da chuva antes e após início do escoamento em superfície; e energia cinética da precipitação natural, conforme Wischmeier & Smith (1978) e as equações propostas por Foster et al. (1981) e Wagner e Massambani et al. (1988).

3.4.5 Análise do Índice de Cobertura Vegetal

Para avaliação da cobertura vegetal de cada parcela experimental foram tomadas fotografias digitais aos 0, 20, 40, 60, 80 e 100 DAS. As fotografias foram feitas antes da aplicação de chuvas com o simulador. Durante o período de avaliação, a aquisição das imagens era feita entre 11 e 12 h, de altura igual a 1,50 m em relação à superfície do solo, com foco na área de 0,70 m², delimitada por cada chapa de aço de cada parcela e zoom de 1.4.

Para estimar a taxa de cobertura do solo foi utilizado o algoritmo “Serobin”, desenvolvido por Varella et al. (2002), implementado no programa computacional MATLAB (Cruz et al., 2008), tendo como princípio uma função binária baseada na função discriminante

de Fisher. De acordo com Johnson & Wichern (1999) essa função discriminante minimiza probabilidades de má classificação, quando se estuda populações normalmente distribuídas.

Na etapa de preparação foi necessário cortar individualmente as imagens para eliminar a chapa de aço, que delimita as parcelas. Posteriormente feita a amostragem de dez pontos representativos do atributo planta e dez pontos do atributo solo nas fotografias. Embora Cruz et al. (2008) relatem que esta amostragem deve ser feita em todas as imagens, neste estudo não foi necessário, uma vez que no “Serobin” há possibilidade de classificação de várias imagens a partir de uma amostrada tomada como base.

Foi amostrada uma imagem base por tratamento para posterior classificação das demais, pois no tratamento soja sob plantio direto (PD) considerou-se a soja e a palhada da cultura anterior (milho – *Zea mays*) como mesma cobertura. Por outro lado, na soja sob preparo convencional (PC) somente foi considerada a soja como planta. Na pastagem (PA) optou-se por utilizar a imagem base desse tratamento para maior critério de classificação das demais fotografias, embora a imagem base do PC pudesse estimar a taxa de cobertura deste tratamento.

3.4.6 Análise dos Dados

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas no tempo. Nas parcelas foram avaliados quatro tipos de cobertura do solo (SE, PC, PD e PA) e nas subparcelas seis épocas de avaliação (0, 20, 40, 60, 80 e 100 DAS). Os valores médios de perda de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) e de água ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), tempo para início do escoamento (min), índice de cobertura vegetal (%), rugosidade da superfície do solo (mm), resistência à penetração (MPa) e atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância e as médias entre os níveis do fator tipo de cobertura foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Caracterização das Precipitações

Os dados de precipitação natural foram obtidos em estação automática localizada ao lado da área experimental. Os eventos de precipitação natural ocorreram de forma distribuída totalizando 859,40 mm, além da manutenção do teor de umidade do solo, enquanto que a chuva simulada totalizou 360 mm (Figura 3). Deste modo o pré-molhamento artificial nas parcelas foi realizado no primeiro dia (0) e aos 60 dias após a semeadura da cultura da soja (DAS) e, nas demais etapas pela chuva natural. Os eventos de precipitação natural produziram erosividade acumulada de 7353,985 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. A energia cinética por evento de chuva artificial variou de 1552 a 1782 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. Essa variação decorre da calibração do simulador e, principalmente da intensidade de precipitação, que variou de 58,3 a 61,7 mm h⁻¹ nas etapas estudadas.

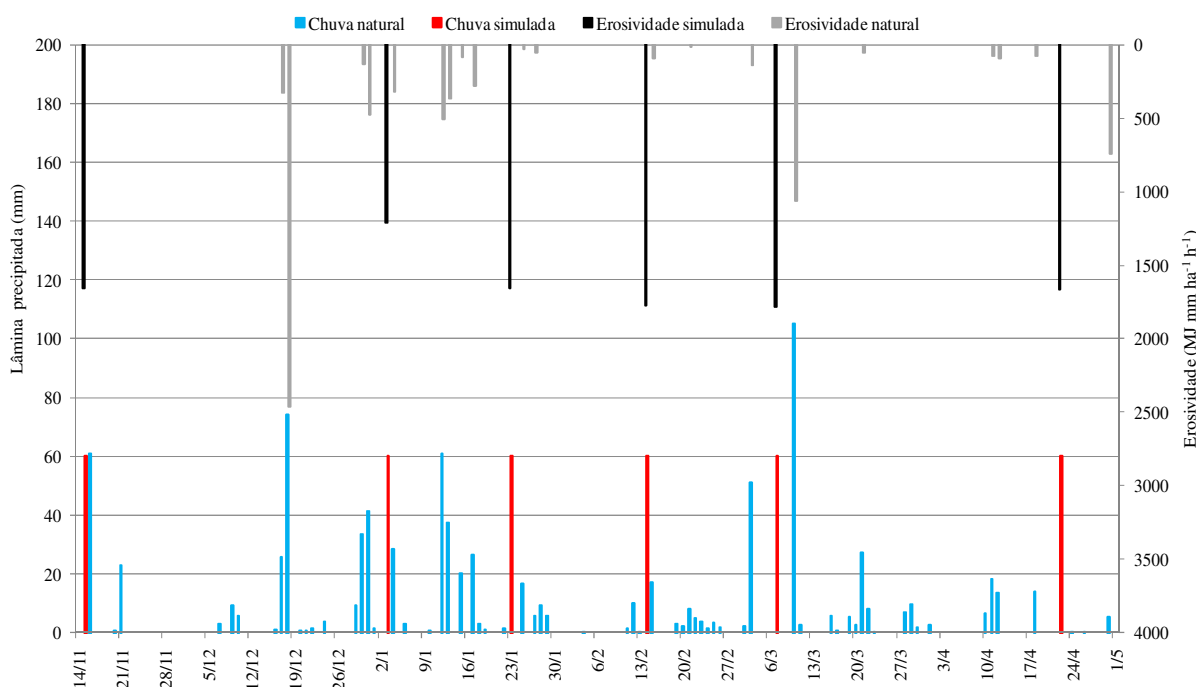


Figura 3. Distribuição dos eventos pluviométricos (naturais e simulados, mm) e suas respectivas erosividades (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹) no período de 14/11/2013 a 01/05/2014, na área experimental em Aquidauana - MS.

3.5.2 Perdas de Água e de Solo

As maiores variações das perdas médias de solo e de água por tratamento durante os 60 min de chuva artificial foram observadas nos momentos iniciais após escoamento em superfície, independente dos tratamentos e das épocas avaliadas (Figura 4). Nos tratamentos SE e PC possivelmente resulta da superfície de solo exposta à ação erosiva da chuva. Nas parcelas com cobertura vegetal (PD e PA) essas perdas variam de maneira estável ao longo do tempo de aplicação de chuva, à exceção da pastagem aos 100 DAS (Figura 4B).

As lâminas escoadas em superfície, independente do sistema de cultivo tiveram padrão crescente ao longo das chuvas com tendência de estabilização ao final dos 60 minutos

(Figuras 4A e 4B). Nas áreas com cultivo de pastagem e soja sob plantio direto foram obtidas menores lâminas de escoamento em todas as épocas em relação aos demais tratamentos.

A presença de cobertura vegetal atua como barreira física ao efeito do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e diminui o escoamento superficial e a geração de sedimentos (Panachuki et al., 2006a; Carvalho et al., 2009; Eduardo et al., 2013). Além da presença das culturas nesses sistemas, o crescimento progressivo destas, as diferenças na constituição morfológica e arquitetônica interfere no processo hídrico erosivo.

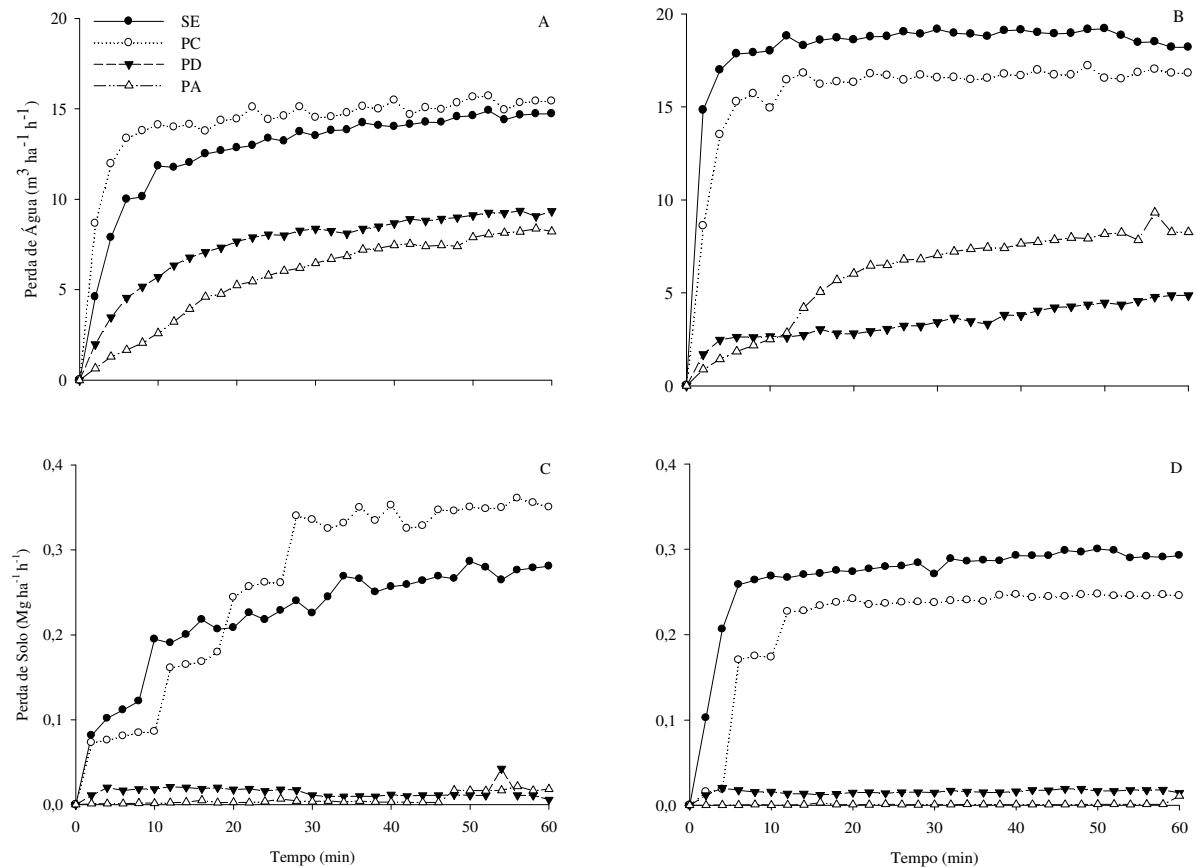


Figura 4. Representação do padrão de escoamento superficial (A, B) ($m^3 ha^{-1} h^{-1}$) e da geração de sedimentos (C, D) ($Mg ha^{-1} h^{-1}$) correspondente ao tempo de um teste, respectivamente aos 20 e 100 DAS nos sistemas avaliados.

A maior variação nas perdas de solo no período de 1 hora ocorre nos sistemas SE e PC aos 20 e 100 DAS (Figuras 4C e 4D). Esse padrão está relacionado ao revolvimento do solo e à maior exposição da superfície de solo à ação erosiva da chuva nos referidos sistemas. Observou-se escoamento superficial laminar nas parcelas com solo exposto e em sulcos preferenciais na linha de plantio no tratamento com soja aos 20 DAS.

Outro fator que interfere no processo erosivo é o próprio solo por meio de seus atributos físicos. Nos sistemas com cobertura vegetal, as raízes das plantas atuam como fornecedoras de matéria orgânica ao solo, e esta, por sua vez atua como agente de formação e estabilização de agregados de diâmetros maiores.

O índice de rugosidade ao acaso (RR) no tratamento com ausência de cobertura vegetal aumenta após operações de preparo do solo (Tabela 1). Sendo assim, este índice é semelhante entre o SE e o PC, uma vez que nestes dois tratamentos foi realizado o mesmo preparo do solo. A diferença observada no índice de rugosidade no PC e SE antes do preparo resulta da presença de resíduo vegetal de milho cultivada anteriormente na área de PC. Por

outro lado após a aplicação das chuvas simuladas, em razão do selamento superficial provocado pelo impacto das gotas de chuva no solo a rugosidade em SE é inferior aos demais tratamentos. Em PC, por sua vez o índice RR é semelhante ao PD, e resulta dos restos vegetais da soja dispostos sobre o solo.

Tabela 1. Rugosidade da superfície do solo ao acaso (RR, em mm) por tratamento e por época estudada

Época	SE	PC	PD	PA	Média Geral
Antes do preparo do solo	2,29 b B	10,44 a A	*	*	6,37 b
Após o preparo e antes da aplicação das chuvas	6,44 a C	6,46 b C	13,37 a B	67,29 a A	23,39 a
Depois da aplicação das chuvas	1,24 b C	9,62 a B	9,36 a B	56,34 b A	19,14 a

*Não foi realizado preparo do solo. A avaliação inicial corresponde ao momento antes da aplicação das chuvas. Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, diferem entre si pelo teste de Scott Knott, a 5% de probabilidade.

Na primeira avaliação no sistema de plantio direto, o valor elevado do índice resulta de restos vegetais da cultura do milho, na segunda avaliação, da palhada da soja associada à do milho. Embora a análise de rugosidade seja feita considerando a superfície do solo, na pastagem foi considerada uma aproximação desta, pois a avaliação foi realizada sobre a própria cultura e o próprio rugosímetro limita a medição precisa devido à altura da pastagem. O índice RR obtido na segunda avaliação é menor que a etapa anterior devido às operações de simulação de chuvas, que provocam acamamento ou tombamento da pastagem.

A redução do índice de rugosidade no tratamento SE favoreceu a perda de solo com a aplicação das chuvas conforme apresentado (Figuras 4C e 4D).

Em todas as avaliações as menores perdas de solo foram verificadas nos tratamentos PD e PA (Figura 5). O padrão de perda de solo foi crescente da primeira à terceira avaliação e da quarta à última no sistema SE. No PC, de maneira geral, as perdas foram crescentes em relação à etapa anterior e decrescentes em relação à posterior, sendo verificado aos 40 DAS que a cultura da soja dissipou parte da energia da chuva, o que resultou em menor desagregação de partículas e menor perda de solo neste sistema.

Aos 80 DAS houve diminuição acentuada das perdas de solo, resultante do maior índice de cobertura vegetal proporcionado pela cultura da soja nesta etapa e, aos 100 DAS a maior quantidade de solo erodido é explicada pela menor cobertura do solo em razão do dessecamento da cultura da soja antes no período de colheita.

As reduzidas perdas de solo no PD e PA resultam da cobertura vegetal da cultura atual e resíduos vegetais da cultura anterior sobre a superfície do solo, por atuar como barreira física ao impacto da gota de chuva, além da manutenção do teor de umidade do solo, o que diminui a oscilação do conteúdo hídrico no solo.

As perdas de solo observadas no SE aos 40 e 100 DAS superam em 82,5 e 168,79 aquelas observadas no PA e 46,26 e 16,15 vezes quando comparadas ao PD. O padrão de perda de solo no SE é crescente a partir da época zero (0 DAS), pois há maior selamento da

superfície do solo e conseqüente diminuição da rugosidade superficial (Tabela 1). Além da rugosidade baixa, o teor de umidade armazenada no solo no momento antecedente à aplicação da chuva artificial favoreceu a desagregação das partículas do solo e proporcionou a maior geração de sedimentos aos 40 DAS, o que totalizou a quantia de $11,40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Nas etapas seguintes ocorreram diminuição dos valores de perda de solo, entretanto, aos 100 DAS houve aumento destes, possivelmente decorrente do efeito combinado da energia cinética da chuva, menor índice de rugosidade e maior selamento da superfície e umidade do solo alta, ocasionada pelo armazenamento de água no solo dos diversos eventos de precipitação natural que antecederam os testes. Por outro lado, as perdas de solo quantificados no PA foram em média 2,55 vezes menores que no sistema PD ao longo do período estudado, e aos 100 DAS foram observadas perdas de solo no PD superiores a 8,9 vezes as da PA.

Com relação às perdas de solo dentro de cada época estudada foi observada diferença (Scott Knott, $p < 5\%$) apenas aos 40 e 80 DAS entre o sistema SE e soja sob preparo convencional de solo (PC), o que demonstra o efeito do preparo do solo no processo erosivo. Os sistemas PD e PA não diferiram entre si no estudo.

No SE e PC o aumento gradativo nas perdas de solo e água à medida que se aplicavam as chuvas simuladas decorrem possivelmente do efeito da energia cinética da chuva em promover o selamento superficial e diminuir a rugosidade superficial do solo, conforme relatado por Panachuki et al. (2011). Ainda no PC, a partir dos 40 DAS, a cultura da soja interfere nas perdas, sobretudo de solo devido ao maior índice de cobertura em relação às duas primeiras etapas e aos 80 DAS foi obtida a menor perda de solo, quando o índice de cobertura pela cultura da soja foi máximo, o que demonstra a importância da cobertura vegetal para a proteção do solo.

Embora estudos com a cultura da soja apontem que as perdas de água sejam fortemente influenciadas pelos sistemas de preparo do solo (Vieira et al., 1978), neste estudo foi constatado que as perdas de solo são mais influenciadas pelo manejo do solo quando comparadas às perdas de água. Engel et al. (2009) constataram perdas por escoamento superficial decorrentes do processo erosivo influenciadas tanto pelas condições de superfície (cobertura vegetal, cobertura do dossel ou rugosidade ao acaso) quanto pelas condições físicas do solo e pelo sistema de preparo, que em subsuperfície provocaram relativo grau de compactação do solo, além de alterar a porosidade interna das camadas superficiais do solo. Devido à interação destes fatores é difícil determinar qual deles exerce maior efeito no processo de erosão do solo (Wischmeier & Smith, 1978).

Independente da época de avaliação, os maiores valores de tempo para início do escoamento em superfície foram obtidos na pastagem e no sistema de plantio direto, respectivamente (Figura 6). Na área de pastagem o tempo inicial de escoamento aumentou ao longo do período de avaliação e foi maior que nos demais sistemas em todas as épocas, possivelmente pelo maior incremento de biomassa desta cultura. Nas últimas duas etapas de avaliação não houve escoamento em superfície em duas repetições deste sistema por tempo de precipitação de 60 minutos, sendo o simulador de chuvas desligado e o teste finalizado. Nos demais sistemas houve diminuição deste tempo, sobretudo por causa do selamento superficial decorrente da ação das gotas de chuva e, apenas aos 60 DAS o PD diferiu do SE e do PC. Embora nas outras épocas não tenha diferença, o tempo para escoamento no PD foi superior àquele dos demais sistemas.

Constatou-se ainda que aos 40 DAS houve aumento do tempo de início de escoamento no PC e PD, ocasionados neste estudo pelo desenvolvimento da cultura da soja, visto que de maneira isolada, a presença da cobertura do solo por resíduos vegetais é o fator mais importante na dissipação da energia de impacto das gotas da chuva na superfície do solo, pois evita a desagregação de suas partículas (Panachuki et al., 2011).

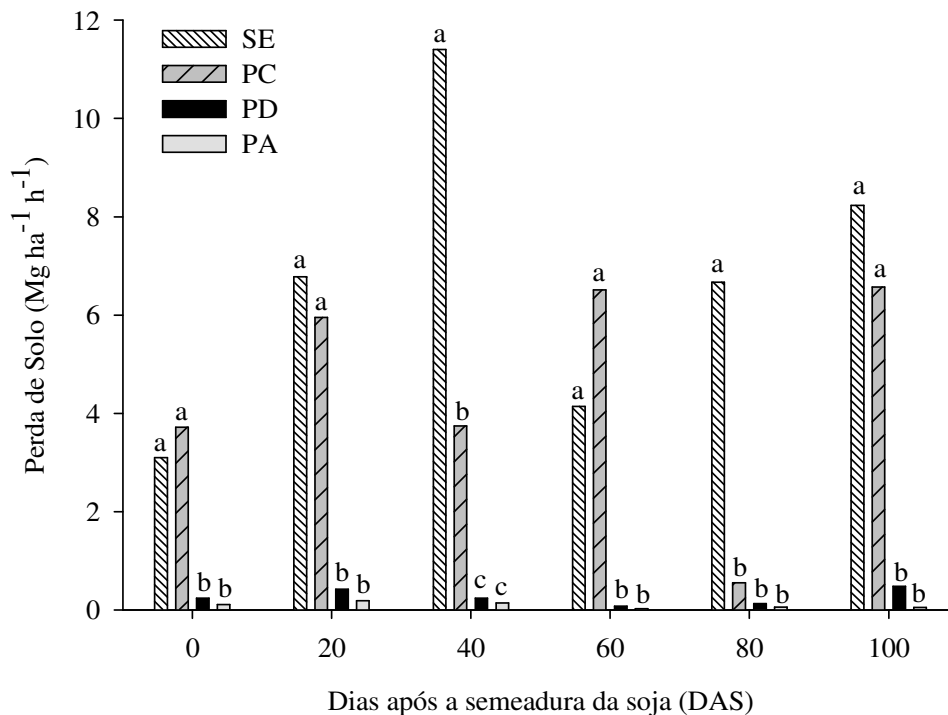


Figura 5. Perdas de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) para os quatro sistemas de cultivo por época estudada em área de Argissolo Vermelho Distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

As diferenças entre os tempos para o início do escoamento superficial estão estreitamente relacionadas ao tipo e quantidade de cobertura vegetal sobre a superfície do solo, que no PC, PD e PA aumentam com o desenvolvimento e crescimento das culturas. Guzha (2004) também observaram esse efeito da cobertura vegetal no tempo para início de escoamento. Ainda, a interação das condições de superfície do terreno com as propriedades físicas do solo (Tabela 2) levou a diferenças no tempo para início de escoamento superficial.

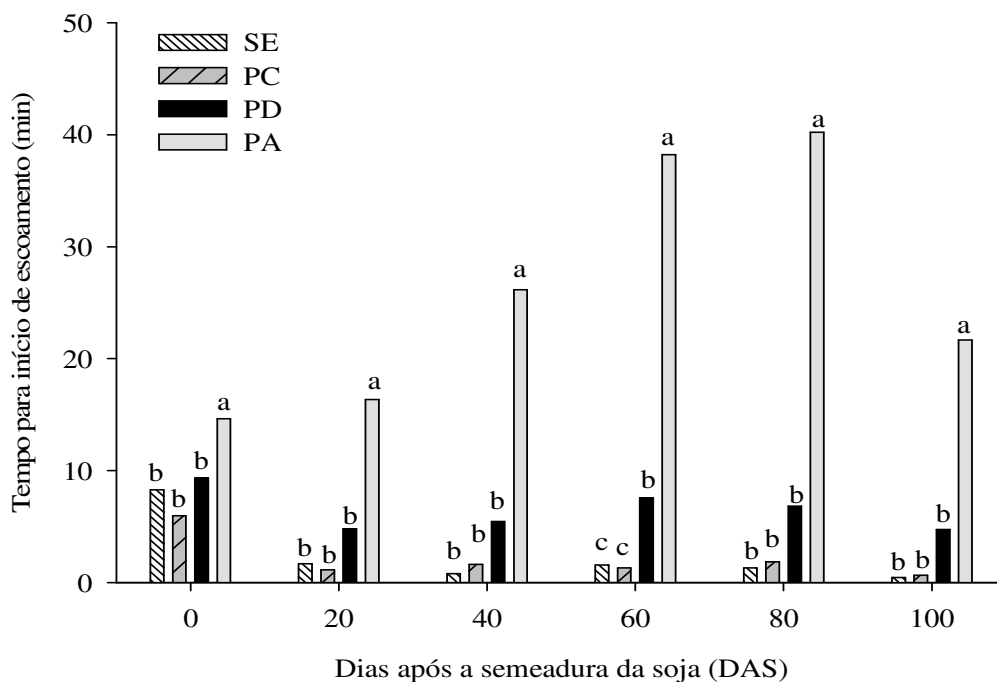


Figura 6. Tempo para o início de escoamento em superfície (min) em área de Argissolo Vermelho Distrófico sob diferentes sistemas de cultivo. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

Verificou-se diferença (Skott-Knott, 5%) na densidade e na porosidade do solo (macro, micro e total) entre os sistemas. Para a camada superficial na pastagem (PA) foi constatado maior macroporosidade, possivelmente relacionado ao teor de matéria orgânica proveniente das raízes das plantas. Nesta camada também foram verificados valores de DMG e DMP maiores que nos demais sistemas, o que torna este sistema mais resistente à desagregação (Panachuki et al., 2006b), pois contribui com a estabilidade dos agregados (Prado et al., 2014). No sistema PD, embora numericamente maior, o valor de DMP foi igual aqueles obtidos em SE e PC. Contudo, fica evidenciado o efeito da estabilidade dos agregados na estrutura do solo, sobretudo nos sistemas considerados conservacionistas (PD e PA), nos quais a matéria orgânica atua como agente floculante e cimentante, formando agregados maiores e mais estáveis, conforme observado em outros estudos (Panachuki et al., 2006b; Prado et al., 2014).

Os valores da macroporosidade do solo foram maiores e a densidade do solo foi menor na camada superficial (0-10 cm). A estabilidade de agregados (DMG e DMP) reduziu numericamente com a profundidade (Tabela 2), embora tenha sido observada diferença para DMG em PA; e DMP em PD e PA, respectivamente. De maneira geral, as diferenças entre as profundidades do solo devem-se ao menor teor de matéria orgânica em profundidade, associado à maior densidade na camada de 20-40 cm e o maior conteúdo de argila.

Os valores de DMG observados na camada mais profunda do solo (20-40 cm) foram menores 35,71; 47,44; 63,30 e 168,42%, e os de DMP 66,10; 59,23; 111,21 e 134,0%, respectivamente, em relação aos valores da camada superficial do solo (0-10 cm) dos sistemas SE, PC, PD e PA. Isto indica que a estabilidade de agregados reduziu com aumento da profundidade do solo, assim como verificado por Souza et al. (2005). Estes resultados estão relacionados à presença de cobertura vegetal em superfície (Shukla et al., 2003), sobretudo em PD e PA, conforme maiores valores obtidos, bem como à maior concentração de raízes na camada superficial do solo que adicionam matéria orgânica ao solo, o que de acordo com Prado et al. (2014), contribui com a estabilidade dos agregados.

Considera-se como limite crítico da densidade do solo, geralmente, para a maioria das culturas valores próximos ou maiores que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (Corsini & Ferraudo, 1999; Baquero et al., 2012). Os valores observados na camada superficial do solo (0-10 cm) dos sistemas SE e PD não são, de acordo com este critério, restritivos ao desenvolvimento radicular. Contudo, nas demais profundidades os valores foram superiores ao limite crítico, assim podem ser consideradas como compactadas. As camadas de solo com valores elevados de densidade do solo e baixa macroporosidade favorecem a erosão hídrica do solo e limitam o crescimento de raízes (Corsini & Ferraudo, 1999).

Com relação à resistência à penetração no solo foi observada diferença por camada, apenas na superficial (0-10 cm) no sistema plantio direto (PD), que apresentou maior resistência em relação aos demais sistemas, possivelmente pelo não revolvimento do solo.

De maneira geral, a resistência à penetração foi maior com aumento da profundidade e exceto no sistema solo exposto (SE) não foi observada diferença entre as camadas 0-20 e 20-40 cm, possivelmente decorrente da compactação do solo, ocasionada por sua acomodação após o preparo, além da ausência de cobertura vegetal, o que intensifica o efeito do impacto da gota de chuva sobre o solo.

Dentre os fatores que afetam o processo erosivo e o tempo inicial para escoamento em superfície, destacam-se as condições de rugosidade da superfície do terreno, a cobertura vegetal sobre o solo, e o teor de umidade do solo antecedente às chuvas (Tabela 3). Segundo Marioti et al. (2013) e Vahabi & Nikkami (2008), apenas a umidade antecedente pode ser o fator determinante nas perdas de água.

Os valores de umidade do solo antecedente aos testes de campo foram semelhantes nas profundidades avaliadas dentro de cada tratamento. Contudo, observou-se diferença entre a

camada superficial (0-10 cm) e as demais nos tratamentos PC (20 e 40 DAS), PA (20 DAS e 80 DAS). Essas diferenças associarem-se à operação de pré-molhamento, que teve por objetivo oferecer condições de umidade uniforme a todas as parcelas (Cogo et al., 1984; Panachuki et al., 2011), bem como à capacidade de retenção de água no solo nos microporos (Tabela 2), ou seja, à natureza do próprio solo.

Tabela 2. Valores médios dos atributos físicos das camadas do Argissolo Vermelho distrófico da área experimental

Profundidade (cm)	SE	PC	PD	PA	Média Geral
Atributos físicos do solo					
Macroposidade (%)					
0-10	17,15 b A	18,47 a A	14,16 b A	21,67 a A	17,86 A
10-20	10,93 a B	11,13 a B	13,96 a A	9,92 a B	11,48 B
20-40	8,55 a C	8,45 a B	9,03 a B	8,15 a B	8,54 C
Microposidade (%)					
0-10	18,73 a B	16,85 a B	18,74 a A	17,77 a A	18,02 B
10-20	20,50 a A	19,14 a A	17,82 a A	19,26 a A	19,18 A
20-40	19,87 a A	19,86 a A	19,25 a A	17,96 a A	19,23 A
Porosidade total (%)					
0-10	35,88 b A	35,33 b A	32,90 b A	39,43 a A	35,89 A
10-20	31,43 a B	30,27 a B	31,78 a A	29,17 a B	30,66 B
20-40	28,41 a B	28,30 a B	28,28 a B	26,10 a C	27,77 C
C orgânico (g kg ⁻¹)					
0-10	42,25 a A	31,33 b A	29,80 b A	36,48 a A	34,96 A
10-20	19,57 b B	31,44 a A	19,46 b B	18,78 b B	22,31 B
20-40	17,53 a B	18,10 a B	16,51 a B	14,81 a B	16,74 C
Densidade do solo (Mg m ⁻³)					
0-10	1,43 b B	1,39 b B	1,54 a B	1,30 c C	1,42 C
10-20	1,59 a A	1,55 a A	1,57 a B	1,60 a B	1,58 B
20-40	1,66 a A	1,61 a A	1,65 a A	1,69 a A	1,65 A
DMG (mm)					
0-10	1,14 b A	1,15 b A	1,29 b A	2,55 a A	1,54 A
10-20	1,14 a A	1,50 a A	0,90 a A	1,30 a B	1,21 B
20-40	0,84 a A	0,78 a A	0,79 a A	0,95 a B	0,84 C
DMP (mm)					
0-10	1,91 b A	2,07 b A	2,26 b A	3,44 a A	2,42 A
10-20	1,92 a A	2,48 a A	1,46 a B	2,07 a B	1,98 B
20-40	1,15 a A	1,30 a B	1,07 a B	1,47 a B	1,25 C
RP (MPa)					
0-10	0,32 b C	0,44 b B	0,99 a A	0,42 b B	0,54 B
10-20	0,91 a B	1,07 a A	0,77 a A	1,35 a A	1,03 A
20-40	1,43 a A	1,00 a A	1,03 a A	1,37 a A	1,21 A

DMG=diâmetro médio geométrico, DMP=diâmetro médio ponderado dos agregados e RP=resistência à penetração obtida com penetrógrafo de bancada. Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott Knott, a 5% de probabilidade.

Além disso, a ocorrência de precipitação natural durante a realização dos testes (Figura 3) interfere no teor de umidade do solo nas repetições do mesmo tratamento e entre tratamentos, visto que era preciso desligar o simulador em caso de chuva, assim o intervalo do pré-molhamento ao início do teste foi diferente entre algumas etapas.

As precipitações naturais que antecederam as etapas dos 20, 40, 80 e 100 DAS tornaram desnecessário o pré-molhamento com o sistema de gotejamento e proporcionaram umidade adequada e uniforme nos sistemas de cultivo estudados (Tabela 3).

Em relação ao escoamento em superfície na avaliação individual das épocas os sistemas SE e PC diferem apenas aos 80 DAS, com a diminuição do volume escoado em PC

(Figura 7). Nos sistemas PD e PA houve diferença a partir dos 60 DAS até a última etapa avaliada, sendo verificado aumento no escoamento superficial no PA. Esse efeito de aumento do escoamento superficial na pastagem em relação ao PD pode ser resultante da quantidade de massa vegetal e arquitetura das gramíneas, as quais por meio das folhas e colmos favorecem o fluxo de água em direção à base das plantas, intensificando dessa forma o escoamento superficial quando comparado ao PD onde a palhada na superfície do solo constitui barreira física ao escoamento de água, e assim a formação de poças de água diminui a enxurrada e o impacto da gota sobre o solo.

Tabela 3. Valores médios de umidade do solo antecedente aos testes em campo

Profundidade	Umidade antecedente à chuva (cm ³ cm ⁻³)				Média Geral
	SE	PC	PD	PA	
0 DAS					
0-10	24,62 a A	20,72 a A	17,30 b A	22,51 a A	21,29 A
10-20	22,56 a A	23,17 a A	17,99 b A	21,88 a A	21,39 A
20-40	21,25 a A	20,30 a A	17,77 a A	24,50 a A	20,95 A
20 DAS					
0-10	12,11 a A	12,44 a A	15,75 a A	12,89 a A	13,29 A
10-20	14,96 a A	15,74 a B	16,59 a A	19,03 a B	16,58 B
20-40	15,92 a A	17,78 a B	17,36 a A	17,15 a B	17,05 B
40 DAS					
0-10	11,82 a A	6,77 b A	11,63 a A	12,01 a A	10,57 A
10-20	13,27 a A	9,64 a B	12,51 a A	15,24 a A	12,66 B
20-40	15,16 a A	12,43 a B	15,25 a A	16,06 a A	14,72 C
60 DAS					
0-10	8,54 a A	4,61 a A	6,20 a A	8,81 a A	7,04 A
10-20	10,31 a A	4,56 b A	6,47 b A	8,70 a A	7,51 A
20-40	13,01 b A	4,51 a A	7,02 a A	6,90 a A	7,86 A
80 DAS					
0-10	14,60 a A	8,09 b A	13,81 a A	11,84 a A	12,08 A
10-20	15,66 a A	10,53 b A	15,77 a A	16,25 a B	14,55 B
20-40	15,12 a A	10,95 b A	16,90 a A	17,73 a B	15,17 B
100 DAS					
0-10	13,23 a A	13,08 a A	22,56 b A	16,30 a A	16,29 A
10-20	15,58 a A	12,63 a A	22,85 b A	20,29 b A	16,86 A
20-40	15,87 a A	13,97 a A	19,43 b A	18,17 b A	17,83 A

*Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem entre si pelo teste de Scott Knott, a 5% de probabilidade.

As perdas de água na pastagem são 125,48 e 96,63% menores que a maior perda verificada no SE e PC (100 DAS), respectivamente. Por sua vez, no plantio direto essas perdas são 431,16 e 361,19% menores quando comparado aos mesmos sistemas também aos 100 DAS. O aumento do escoamento nos sistemas aos 100 DAS em relação à etapa anterior é justificado, em PC e PD pelo menor índice de cobertura por causa da dessecação da cultura da soja, associados à maior umidade antecedente aos testes. Em SE, condições da superfície associadas à umidade e, em PA à combinação da umidade antecedente e arquitetura e quantidade da gramínea.

O efeito temporal da erosão hídrica do solo foi avaliado por meio do teste Scott Knott, e verificou-se combinação de efeitos entre época e sistema de cultivo para $p < 5\%$, considerando fator duplo (época e sistemas de cultivo).

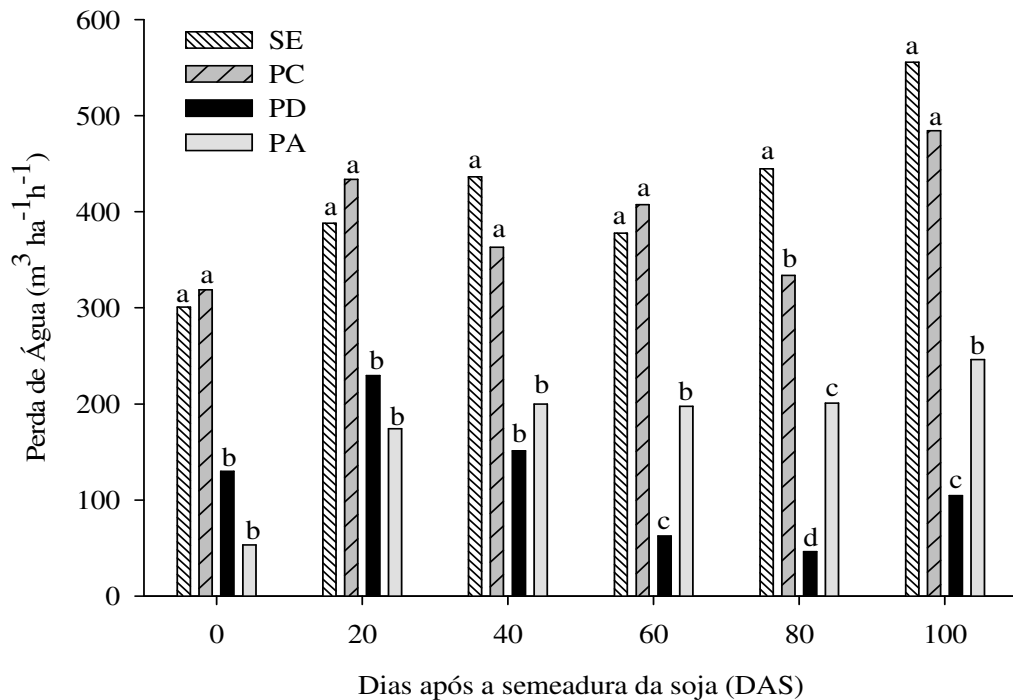


Figura 7. Representação das lâminas escoadas ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) para os quatro sistemas de cultivo por época estudada em área de Argissolo Vermelho distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

3.5.3 Taxa de Cobertura Vegetal

A partir das imagens digitais obtiveram-se as imagens binárias para estimar o índice de cobertura vegetal (ICV). Observa-se nas imagens referentes aos 20 dias após a semeadura da cultura da soja (DAS) que a cor branca representa o atributo planta e a cor preta, o atributo (Figura 8).

No solo exposto a cobertura vegetal foi igual a zero durante todo o estudo, o que caracterizou este tratamento como mais susceptível ao processo erosivo em comparação aos demais. Por outro lado, nos tratamentos PC e PD houve incremento de cobertura vegetal da primeira à última etapa avaliada devido ao desenvolvimento e crescimento da soja. No tratamento pastagem o índice de cobertura se manteve semelhante entre as épocas estudadas.

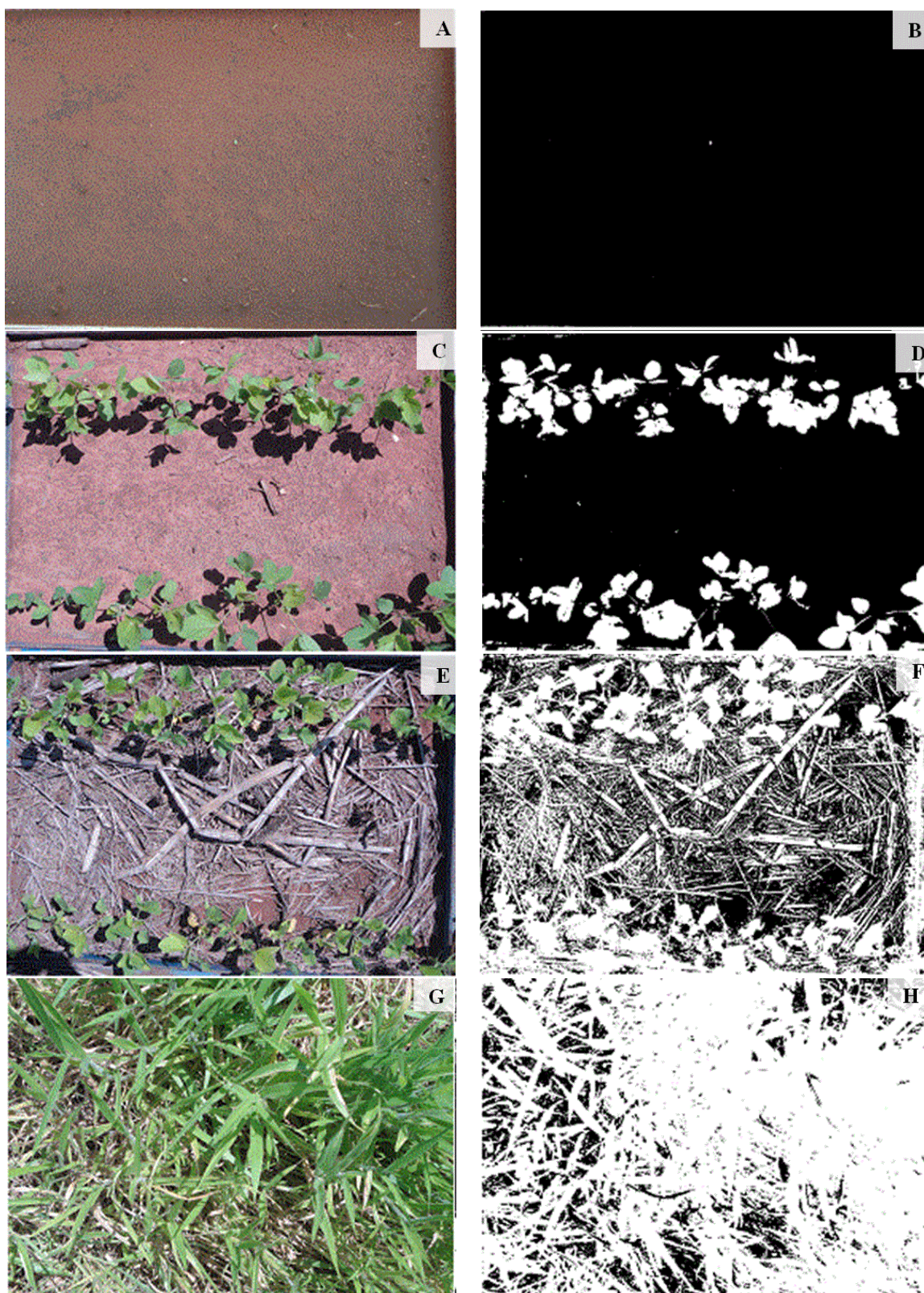


Figura 8. Imagens digitais (A, C, E, G) e binárias (B, D, F, H) para estimativa do índice de cobertura vegetal aos 20 dias após a semeadura da cultura da soja (DAS).

De maneira geral a pastagem teve maior cobertura vegetal, com média de 81,34% e variando de 74,9 ao máximo de 98,1%. Apenas nas épocas 60 e 80 DAS o ICV foi 8,06 e

12,30% menor, respectivamente, que no sistema convencional de cultivo de soja, no qual o percentual de cobertura variou de zero a 93,75% (Figura 9). Constatou-se que no cultivo de soja sob plantio direto, o índice de cobertura em média foi 60,15% e variou de 37,37 a 84,50 aos 40 DAS. Aos 60 e 80 DAS foi menor que o ICV do sistema convencional de cultivo 34,52% e 65,65%, respectivamente. Entretanto, nas duas primeiras etapas do estudo o ICV do plantio direto foi 3,7 e 2,8 vezes maior que no sistema convencional, o que resulta em menores perdas de solo. Dessa maneira, a soja dissipou a energia cinética da chuva e o solo foi protegido do impacto direto da gota de chuva, além de não ter sido revolvido.

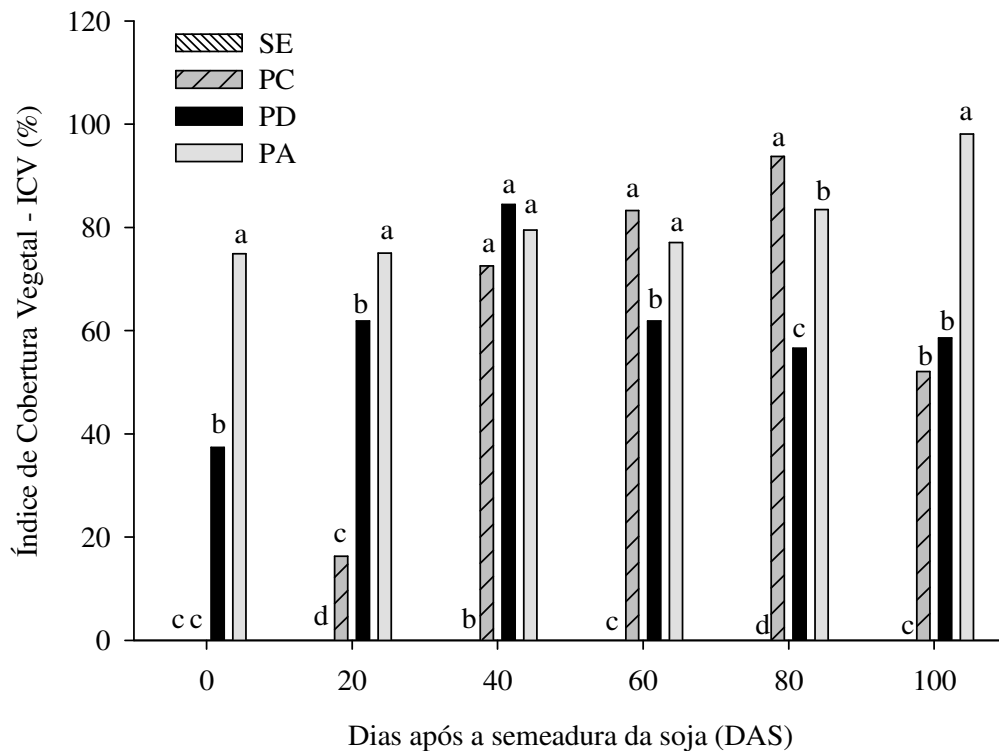


Figura 9. Índice de cobertura vegetal (%) nos sistemas de cultivo por época de avaliação em área de Argissolo Vermelho distrófico. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

Aos 100 DAS houve aumento do índice de cobertura da pastagem, quando este sistema atingiu seu maior ICV. De outro modo, os ICV do sistema soja sob preparo convencional e plantio direto diminuíram devido ao dessecamento da cultura dias antes desta última etapa. Contudo, o valor é maior que 50% pois a cultura não havia sido colhida no momento da avaliação final.

3.6 CONCLUSÕES

A redução da erosão do solo sob cultivo de soja está associada à adoção de sistemas de cultivo que não revolvem o solo associados a altos índices de cobertura vegetal.

A redução do índice de cobertura vegetal associado ao revolvimento do solo promove a desagregação do solo pela ação de chuvas.

4. CAPÍTULO II

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO EM SISTEMAS DE CULTIVO E MODELOS PARA ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO, SOB CHUVA SIMULADA

4.1 RESUMO

Foi avaliado o padrão das taxas de infiltração de água no solo e o ajuste dos modelos de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip para estimativa da infiltração de água no solo nos sistemas solo exposto (SE), soja cultivada sob preparo convencional do solo (PC), soja cultivada sob plantio direto (PD) e pastagem estabelecida sem pisoteio animal (PA), totalizando seis épocas de avaliação. A cada 20 dias foram aplicadas chuvas nas parcelas a campo com o infiltrômetro de aspersão portátil (InfiAsper) operando com intensidade de precipitação constante de 60 mm h^{-1} para a medição da lâmina de água infiltrada. Os modelos foram ajustados com os dados de volume de água infiltrada no tempo. No sistema PD foi observada maior taxa de infiltração estável (TIE). Não há diferença na TIE do SE e PC. De modo geral, o modelo de Horton se ajustou melhor aos dados de infiltração de água no solo para os diferentes sistemas de cultivo e época de avaliação.

Palavras-chave: Infiltrômetro de aspersão. Erosão hídrica. Sistemas de cultivo.

4.2 ABSTRACT

There were evaluated the pattern of water infiltration rates into the soil and the fit of the models of Kostiakov-Lewis, Horton and Philip to estimate water infiltration in systems bare soil (BS), soybeans grown under conventional tillage (SCT), soybeans grown under no-tillage (SNT) and pasture established without animal trampling (PA) in six seasons. Every 20 days rainfall was applied to the plots in field with portable sprinkler infiltrometer (InfiAsper) operating with constant rainfall intensity of 60 mm h^{-1} for the measurement of blade infiltrated water. The models were fitted to the data volume of water infiltrated in time. In SNT system most stable infiltration rate (TIE) was observed. There was no difference in the TIE BS and SCT. For the different tillage system and evaluation seasons, the best fit was the model of Horton.

Key words: Sprinkler infiltrometer. Hidric erosion. Cropping systems.

4.3 INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo, considerada como a passagem da água pela interface atmosfera-solo é entendida como um processo chave sob o ponto de vista hidrológico. Interfere no conteúdo de água no solo, na elaboração de projetos de irrigação e de manejo e conservação do solo e da água.

Pode ser modificada pela alteração das propriedades físicas do solo decorrente das práticas de manejo. Dessa maneira a taxa de infiltração de água no solo pode, em certas situações, diminuir o escoamento superficial e as perdas de solo e de água de determinado sistema. As taxas de infiltração constituem parâmetro fundamental para estimativa da infiltração de água por meio de modelos físicos e empíricos amplamente utilizados para esta finalidade. A infiltração pode ser alterada por diversos fatores como preparo do solo, teor de umidade antecedente às chuvas, tempo para início de escoamento superficial rugosidade da superfície, tipo de solo, porosidade, resistência do solo à penetração, densidade do solo, teor de carbono orgânico e por características da própria chuva. Contudo, isoladamente, a cobertura vegetal é o fator de maior influência na infiltração de água no solo.

O conhecimento referente ao padrão de variação da infiltração de água do solo em cada sistema de cultivo agrícola para os processos de transporte no solo é fundamental. Interfere nas taxas de escoamento em superfície, no fornecimento de nutrientes às plantas e até mesmo no ciclo hidrológico. Ainda permite comparar aspectos qualitativos e quantitativos entre os sistemas de uso da terra, possibilitando a escolha daquele que melhor se adapte a cada situação.

No estado de Mato Grosso do Sul, sistemas de plantio entendidos como conservacionistas têm sido bastante difundidos nos últimos anos. Entretanto, ainda há poucos relatos científicos que relacionam a infiltração de água no solo em várias épocas de cultivo sob diferentes usos da terra às taxas de infiltração estimadas por meio de modelos empíricos.

Considerando a importância destas informações, nessa pesquisa foi avaliada a adequação dos modelos matemáticos de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip para estimativa da taxa de infiltração de água no solo em sistema solo exposto ou descoberto, sem cobertura vegetal, cultivo de soja sob preparo convencional do solo, cultivo de soja em plantio direto e pastagem estabelecida sem pisoteio animal, por meio do uso de simulador de chuva.

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Unidade Experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, localizada na cidade de Aquidauana, MS entre as coordenadas 20°27' S, 55°40' W e altitude média de 174 m, de novembro de 2013 a abril de 2014. O solo predominante na área é o Argissolo Vermelho Distrófico típico (Schiavo et al., 2010) com 770 g kg⁻¹ e 120 g kg⁻¹ (0-24 cm); 610 g kg⁻¹ e 250 g kg⁻¹ (50-65 cm) de areia e argila, respectivamente. O clima regional é do tipo Aw (tropical úmido) segundo a classificação de Köppen. De acordo com Santos et al. (2014) os valores médios anuais de temperatura e precipitação são, respectivamente, de 24°C e 1400 mm. O relevo regional predominante é suave ondulado, com declividade média de 0,03 m m⁻¹.

4.4.1 Delineamento e Tratamentos Avaliados

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas no tempo. Nas parcelas foram avaliados quatro tipos de cobertura do solo (SE, PC, PD e PA) e nas subparcelas seis épocas de avaliação (0, 20, 40, 60, 80 e 100 DAS). Os tratamentos foram caracterizados por culturas associadas a sistemas de preparo do solo: solo exposto – SE, sob preparo convencional do solo na direção do declive; soja (*Glicine max* L.) cultivada em sistema de preparo convencional do solo - PC, na direção do declive; soja (*Glicine max* L.) cultivada em sistema de plantio direto - PD; e pastagem estabelecida - PA (*Brachiaria ruziziensis*) sem pisoteio animal.

O preparo convencional do solo foi caracterizado por uma gradagem aradora, seguida de duas gradagens niveladoras/destorroadoras no dia 12/11/2013. A adubação de plantio com a formulação NPK 0-20-20 na dosagem 300 kg ha⁻¹ foi realizada no dia 27/11/2013 e a semeadura da cultura da soja cultivar SYN9074 RR em 13/12/2013.

As avaliações da infiltração de água no solo foram conduzidas com aplicação de chuvas artificiais por meio do simulador de chuvas (Alves Sobrinho et al., 2008) (Figura 1) calibrado para operar com intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹. A área de ação do simulador (0,70 m²) foi contornada por um dispositivo de formato retangular, construído em chapas de aço galvanizado para permitir a obtenção do volume de água escoado superficialmente.

4.4.2 Avaliação da Infiltração da Água no Solo

A lâmina de água infiltrada foi calculada pela diferença entre a lâmina aplicada pelo simulador e a lâmina de escoamento superficial (LES). A LES foi calculada a cada minuto pela relação entre o volume de água escoado e a área da parcela experimental que recebia a precipitação. Dessa forma, a taxa de infiltração foi obtida pela relação entre a lâmina de água infiltrada e o intervalo de tempo de coleta considerado. A taxa final de infiltração era obtida quando se observava a estabilização da lâmina de escoamento superficial que ocorria, geralmente, a partir de 50 minutos de testes com o simulador.

Anteriormente a cada evento de chuva simulada, as parcelas receberam pré-molhamento com objetivo de uniformizar a umidade do solo nos tratamentos, conforme preconizado por Cogo et al. (1984), durante tempo suficiente sem que houvesse escoamento superficial. As amostras para estimativa da umidade eram coletadas nas camadas de 0-10; 10-20 e 20-40 cm e os testes iniciados em seguida.

A partir dos dados de infiltração obtidos ajustaram-se as equações para estimativa da taxa de infiltração em função do tempo. Foram usados os modelos propostos por Kostiaikov-Lewis (equação 1), Horton (equação 2) e Philip (equação 3), descritos em Assouline (2013).

$$i = i_f + \alpha k t^{\alpha-1} \quad (1)$$

$$i = i_f + (i_o + i_f) e^{-\beta t} \quad (2)$$

$$i = b + \frac{1}{2} k t^{-0,5} \quad (3)$$

em que i é a taxa de infiltração, mm h^{-1} ; i_o a taxa de infiltração inicial observada, mm h^{-1} ; i_f a taxa de infiltração final, mm h^{-1} . Os parâmetros α , β , b e k são parâmetros estatísticos dos modelos estimados por regressão não linear utilizando-se o método de Gauss-Newton, minimizando-se a soma dos quadrados dos desvios em relação aos valores de taxa de infiltração obtidos nos testes de campo; e t o tempo de infiltração, min.

A qualidade do ajuste dos modelos foi verificada por meio de regressões não lineares entre os valores estimados e os valores médios observados em cada tratamento estudado, juntamente com os respectivos coeficientes de determinação. Além do coeficiente de determinação (R^2), foram aplicados os índices estatísticos descritos por Willmott et al. (1985): erro padrão de estimativa (EPE) (4), o coeficiente de massa residual (CRM) (5), o coeficiente de ajuste (CA) (6) e a eficiência (EF) (7).

$$\text{EPE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$\text{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

$$\text{CA} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$\text{EF} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_{im})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

em que, O_i são os dados observados; P_i , os dados estimados pelos respectivos modelos; n , o número de observações; \bar{O} a média aritmética das observações; e P_{im} a média aritmética dos dados estimados.

O CRM é uma medida da tendência do modelo. Se o valor observado se aproximar daquele estimado pelo modelo, o valor de CRM se aproxima de zero. Valores positivos de CRM indicam que o modelo subestima as medidas, e quando negativos o modelo superestima as medidas. O CA indica a aproximação dos valores estimados e os observados. O valor de EF compara os valores simulados com o valor médio das medidas experimentais. Melhor ajuste do modelo é verificado quando os valores de R^2 , CA e EF se aproximam da unidade. Valor negativo para EF indica que o valor médio observado experimentalmente representa melhor estimativa para a variável do que o valor estimado.

Considerando os índices estatísticos de avaliação e maior restrição de avaliação de desempenho dos modelos, empregou-se método dos valores ponderados dos escores estatísticos (V_p) (Thiersch, 1997). Para obtenção do V_p , atribuiu-se pesos de 1 a “n” para cada indicador estatístico em cada modelo, onde “n” corresponde ao número de modelos testados. Para diferenciar as equações, adotou-se os valores 1, 2 e 3. Assim o valor 1 foi atribuído ao melhor indicador, o valor 2 ao intermediário e o valor 3 ao pior indicador estatístico. Obteve-se V_p somando todos os pesos atribuídos a cada indicador em cada época de simulação de chuva. O melhor modelo foi o que apresentou o menor valor ponderado (Schneider & Tonini, 2003). Com o

método do Vp foi possível classificar e definir o melhor modelo para a estimativa da taxa de infiltração nos sistemas estudados, considerando as informações e particularidades correspondentes a todos os indicativos estatísticos, e, portanto, resultado confiável.

4.4.4 Análise dos Dados

Os valores médios de taxa de infiltração inicial (mm h^{-1}) e final ou estável (mm h^{-1}) foram submetidos à análise de variância e as médias entre os níveis do fator tipo de cobertura foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Taxa de Infiltração de Água no Solo

Os dados observados de infiltração se ajustaram de maneira satisfatória aos modelos de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip. A lâmina de água infiltrada durante os primeiros cinco minutos é acentuada, e após este período decresce rapidamente nos tratamentos solo exposto (SE) e soja sob preparo convencional do solo (PC) (Figuras 10A, 10B, 10C e 10D). Este fato pode estar associado à macroporosidade do solo (Tabela 2).

O padrão de variação da infiltração de água no solo foi semelhante entre os tratamentos solo exposto (SE) e preparo convencional do solo (PC) ao longo do período estudado. Essa semelhança resulta das operações de preparo do solo, sobretudo na primeira época (Figura 10A, 10B, 10C, 10D), quando o solo encontrava-se solto com mais espaços vazios decorrentes do preparo, o que favoreceu o processo de infiltração em sua fase inicial. Deste modo, verificou-se que o efeito do revolvimento do solo em sistemas de preparo convencional no aumento da infiltração de água é temporário. Resultados similares foram observados por Panachuki et al. (2006b) em Latossolo Vermelho.

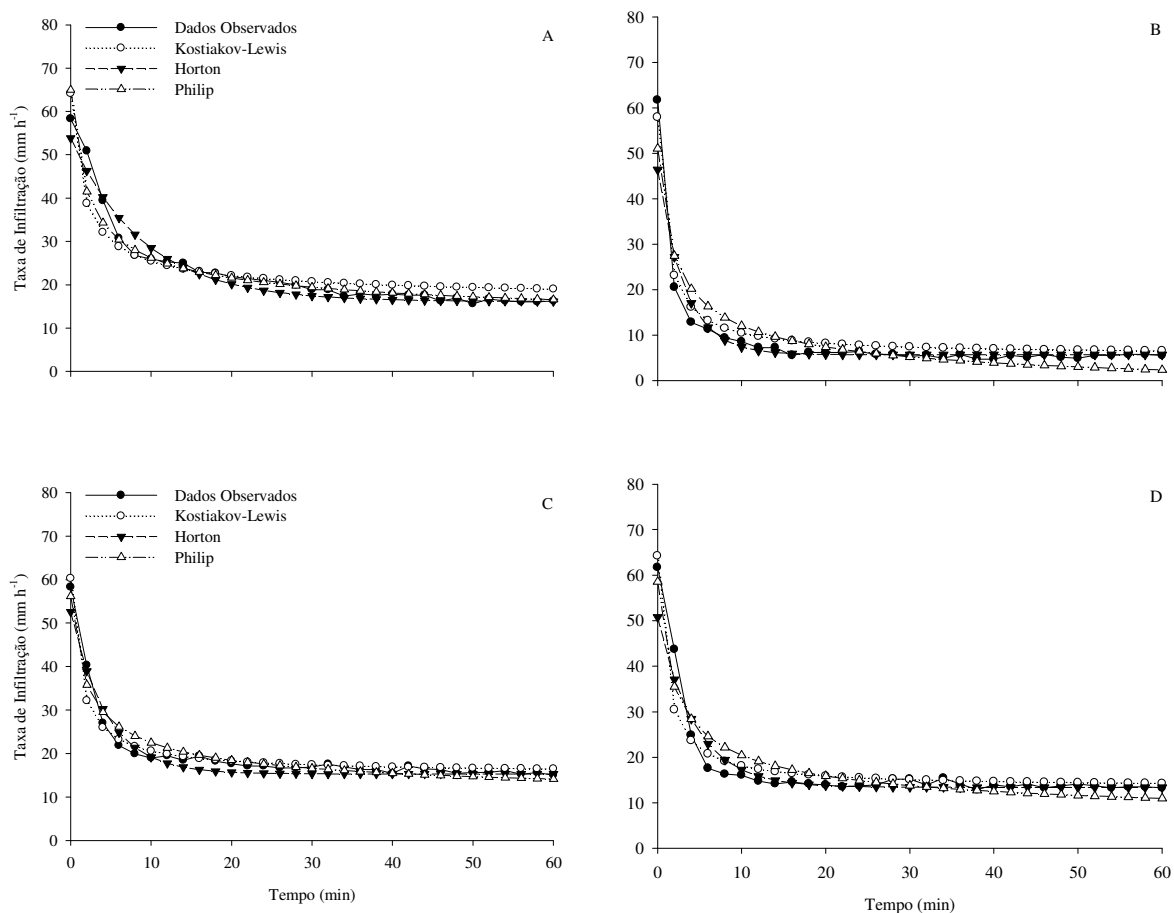


Figura 10. Padrão de variação das taxas de infiltração de água no solo (mm h^{-1}) ao longo do tempo avaliado (min) nos tratamentos SE (A, B) e PC, respectivamente aos 20 e 100 DAS.

Nos tratamentos pastagem (PA) e soja cultivada em sistema de plantio direto (PD) foram obtidas as maiores taxas de infiltração quando comparadas ao SE e PC (Figuras 11A, 11B, 11C, 11D). No PD e PA o padrão de variação é semelhante ao longo do período de estudo e, inversamente ao que ocorre no SE e PC, o decréscimo da infiltração de água no solo é menos acentuado. As maiores lâminas de água infiltrada no PD e PA estão relacionadas ao efeito da cobertura vegetal, que dissipou a energia cinética das gotas de chuva, minimizando o impacto das gotas no solo, além de diminuir a velocidade da enxurrada. Assim, o efeito dos atributos físicos, principalmente a porosidade e a estabilidade de agregados (Tabela 2) na melhoria da estrutura do solo, aumentaram a quantidade de água infiltrada. Outro fator que contribuiu para a retenção de água nas depressões da superfície e para aumento do tempo de início do escoamento superficial foi o maior valor de rugosidade da superfície do solo verificado nos sistemas PD e PA. Este valor resultou da biomassa vegetal da pastagem (Guzha, 2004) e dos restos culturais do PD, o que reduziu o problema relativo do selamento superficial, e possibilita maior infiltração de água no solo.

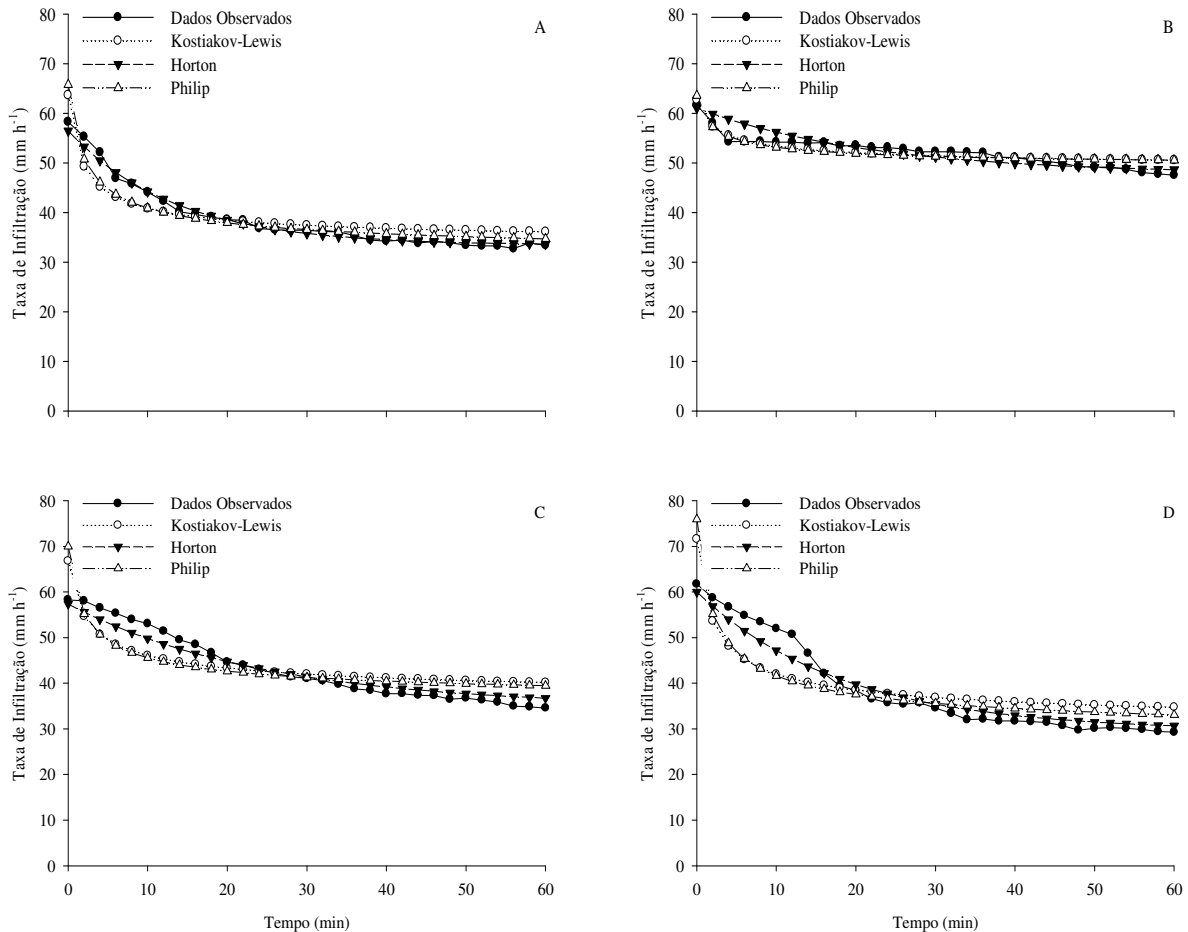


Figura 11. Padrão de variação das taxas de infiltração de água no solo (mm h^{-1}) ao longo do tempo avaliado (min) nos tratamentos PD (A, B) e PA (C, D), respectivamente aos 20 e 100 DAS.

De maneira geral, a qualidade do ajuste dos modelos foi satisfatória. Tal afirmação se baseia na análise dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões não-lineares ajustadas e valor de V_p em cada tratamento estudado. Constata-se ainda, que o modelo de Horton, de modo geral, foi o que apresentou melhores índices de ajustes para condições de solo com cobertura de solo e épocas de avaliação e apresentou valores de R^2 sempre acima de 0,83.

Algumas equações subestimam os valores de infiltração no início da aplicação das chuvas, outras superestimam. No entanto, todos apresentam comportamento que segue a tendência dos dados observados (Tabelas 4, 5, 6 e 7).

Analisando-se o coeficiente de massa residual, verifica-se que a equação de Horton subestima a taxa de infiltração em PC, PD e PA, enquanto a de Kostiakov-Lewis superestima em Se, PC e PD, comportamento indicado pelos valores positivos do índice CMR das equações de Horton e negativos da de Kostiakov-Lewis. Os menores valores de erro padrão de estimativa (EPE) foram obtidos com o modelo de Horton, sobretudo no SE e PC. Os valores de coeficiente de determinação (R^2), de CRM próximos de zero e CA próximo da unidade, indicam melhor qualidade dos ajustes com o modelo de Horton, em SE e PC. Nos sistemas PD e PA, os modelos de Kostiakov-Lewis e Philip se ajustaram de modo semelhante ao longo do ciclo da cultura. Os maiores valores de EPE em todas as épocas foram obtidos quando se utilizou o modelo de Horton, nos sistemas PD e PA, o que demonstra a precisão desse modelo na predição da taxa infiltração de água. Os valores de coeficiente de determinação (R^2), de CRM próximos de zero e CA próximo da unidade, indicam melhor qualidade dos ajustes com o modelo de Horton, em SE e PC. Ao longo do ciclo da cultura, os valores de R^2 foram superiores para esse modelo quando comparados aos demais.

O modelo de Horton possibilitou ajuste satisfatório dos dados ($R^2 = 90\%$) em estudo do efeito de sistemas de manejo na infiltração de água em Latossolo Vermelho conforme Panachuki et al. (2011). Dessa maneira, os resultados de Panachuki et al. (2011), corroboram aqueles obtidos no presente estudo para os diferentes sistemas. Assim, pode-se afirmar que, em condições dinâmicas de aplicação de água, com uso de simuladores de chuva, o modelo de Horton é mais adequado para a estimativa da taxa de infiltração, pois tem melhor consistência que os demais modelos.

As equações de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip foram comparadas na estimativa da taxa de infiltração de água em Argissolo Vermelho distrófico típico após a colheita da cultura do feijão sob chuva simulada nos cultivo mínimo, preparo convencional e plantio direto. Nessas condições, Santos et al. (2014) concluíram que o modelo de Horton foi o mais adequado para representar o comportamento da taxa de infiltração de água no solo, e recomendam o modelo para a estimativa dessa variável independente do sistema de manejo de solo utilizado.

A realização dos cálculos dos parâmetros estatísticos e atribuição dos valores ponderados possibilitou elencar os modelos de acordo com seu desempenho e assim determinar melhor desempenho do modelo de Philip em SE e PC; e o modelo de Horton como o de melhor desempenho em PD e PA, conforme menores valores acumulados de V_p . Portanto, para cada sistema de cultivo foi considerada o efeito da cobertura e do preparo do solo na infiltração de água no solo, bem como sua estimativa pelos modelos de Kostiakov-Lewis, Horton e Philip.

Tabela 4. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema solo exposto

Parâmetros e índices	0 DAS	Vp	20 DAS	Vp	40 DAS	Vp	60 DAS	Vp	80 DAS	Vp	100 DAS	Vp
Modelo de Kostiakov-Lewis												
α	0,31		0,31		0,0018		0,0015		0,067		0,0012	
k	120,29		151,93		24432,86		23385,51		733,91		43630,04	
EPE	9,11	3	8,46	3	12,78	3	7,64	3	6,45	3	16,81	3
R ²	0,65	1	0,65	1	0,51	1	0,52	1	0,54	1	0,51	1
CRM	-0,03	1	-0,04	1	-0,07	1	-0,03	1	-0,03	1	-0,19	1
CA	1,70	1	1,61	1	1,60	1	1,50	1	1,44	1	1,20	1
EF	0,41	1	0,38	1	0,37	1	0,33	1	0,30	1	0,17	1
$\sum Vp$ K-L	7		7		7		7		7		7	
Modelo de Horton												
β (10 ⁻³)	0,10		0,11		0,30		0,35		0,21		0,32	
EPE	1,30	2	6,25	2	1,99	2	5,50	2	6,24	2	1,40	2
R ²	0,65	1	0,65	1	0,51	1	0,52	1	0,54	1	0,51	1
CRM	-0,03	1	-0,04	1	-0,07	1	-0,03	1	-0,03	1	-0,19	1
CA	1,70	1	1,61	1	1,60	1	1,50	1	1,44	1	1,20	1
EF	0,41	1	0,38	1	0,37	1	0,33	1	0,30	1	0,17	1
$\sum Vp$ H	6		6		6		6		6		6	
Modelo de Philip												
b	20,78		9,45		5,75		16,67		5,71		-4,80	
k	90,50		111,03		92,91		70,34		105,73		111,71	
EPE	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
R ²	0,65	1	0,65	1	0,51	1	0,52	1	0,54	1	0,51	1
CRM	-0,03	1	-0,04	1	-0,07	1	-0,03	1	-0,03	1	-0,19	1
CA	1,70	1	1,61	1	1,60	1	1,50	1	1,44	1	1,20	1
EF	0,41	1	0,38	1	0,37	1	0,33	1	0,30	1	0,17	1
$\sum Vp$ P	5		5		5		5		5		5	

Tabela 5. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema soja sob preparo convencional do solo

Parâmetros e índices	0 DAS	Vp	20 DAS	Vp	40 DAS	Vp	60 DAS	Vp	80 DAS	Vp	100 DAS	Vp
Modelo de Kostiakov-Lewis												
α	0,2834		0,1059		0,2996		0,0019		0,2813		0,0058	
k	144,24		424,73		143,40		20819,33		150,67		8699,79	
EPE	8,43	3	4,51	2	4,00	2	7,87	3	8,89	3	7,98	3
R ²	0,64	3	0,56	3	0,64	3	0,51	3	0,63	3	0,52	3
CRM	-0,03	3	-0,02	2	-0,01	2	-0,04	3	-0,03	3	-0,05	3
CA	2,14	3	1,26	2	1,74	3	1,46	1	1,59	3	1,24	2
EF	0,53	3	0,21	2	0,43	3	0,31	1	0,37	3	0,19	2
$\sum Vp$ K-L		15		11		13		11		15		13
Modelo de Horton												
β (10 ⁻³)	0,1296		0,22		0,13		0,32		0,11		0,22	
EPE	3,43	2	9,58	3	14,72	3	6,78	2	3,40	2	4,05	2
R ²	0,88	1	0,70	2	0,86	1	0,58	2	0,90	1	0,70	2
CRM	0,01	2	0,05	3	0,05	3	0,03	2	0,01	2	0,02	2
CA	1,66	1	1,26	2	1,40	1	2,05	3	1,42	2	1,60	3
EF	0,40	1	0,21	2	0,29	1	0,51	3	0,30	2	0,38	3
$\sum Vp$ H		7		12		9		12		9		12
Modelo de Philip												
b	17,03		7,93		14,88		12,12		17,33		3,98	
k	95,83		96,47		94,15		80,63		99,54		109,14	
EPE	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
R ²	0,74	2	0,74	1	0,74	2	0,74	1	0,74	2	0,74	1
CRM	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
CA	1,71	2	1,20	1	1,57	2	1,56	2	1,26	1	1,18	1
EF	0,41	2	0,17	1	0,36	2	0,36	2	0,21	1	0,15	1
$\sum Vp$ P		8		5		8		7		6		5

Tabela 6. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema soja sob plantio direto

Parâmetros e índices	0 DAS	Vp	20 DAS	Vp	40 DAS	Vp	60 DAS	Vp	80 DAS	Vp	100 DAS	Vp
Modelo de Kostiakov-Lewis												
α	0,22		0,41		0,55		0,29		0,46		0,59	
k	64,23		73,06		43,32		28,48		15,83		25,31	
EPE	3,37	3	6,07	3	2,48	3	0,32	2	0,77	3	0,90	2
R ²	0,61	3	0,70	3	0,77	2	0,64	3	0,72	2	0,78	2
CRM	-0,01	2	-0,02	2	-0,01	2	0,00	1	0,00	1	0,00	1
CA	6,78	3	3,85	3	4,54	3	14,02	3	4,29	3	6,23	3
EF	0,85	3	0,74	3	0,78	3	0,93	2	0,77	3	0,84	3
$\sum Vp$ K-L		14		14		13		11		12		11
Modelo de Horton												
β (10 ⁻³)	59,1		58,3		60,0		60,9		60,9		61,7	
EPE	0,32	2	0,55	2	0,84	2	3,48	3	0,69	2	1,71	3
R ²	0,87	1	0,96	1	0,99	1	0,83	1	0,97	1	0,99	1
CRM	6,09	3	8,23	3	7,19	3	5,36	2	2,26	2	5,59	2
CA	0,19	1	0,39	1	0,30	1	0,06	1	0,27	1	0,17	1
EF	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,01	1	0,00	1	0,00	1
$\sum Vp$ H		8		8		8		8		7		8
Modelo de Philip												
b	43,85		30,16		39,69		51,89		53,80		48,66	
k	33,97		71,26		50,75		17,48		16,05		29,88	
EPE	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
R ²	0,74	2	0,74	2	0,74	3	0,74	2	0,74	3	0,74	3
CRM	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
CA	5,40	2	2,95	2	3,89	2	13,54	2	3,68	2	5,71	2
EF	0,81	2	0,66	2	0,74	2	0,93	2	0,73	2	0,82	2
$\sum Vp$ P		8		8		9		8		9		9

Tabela 7. Parâmetros e índices estatísticos dos modelos de infiltração avaliados no sistema pastagem sem pisoteio animal

Parâmetros e índices	0 DAS	Vp	20 DAS	Vp	40 DAS	Vp	60 DAS	Vp	80 DAS	Vp	100 DAS	Vp
Modelo de Kostiakov-Lewis												
α	0,37		0,56		0,49		0,56		0,55		0,49	
k	16,79		56,51		71,01		72,35		66,25		85,30	
EPE	1,32	3	5,18	3	7,85	3	5,04	3	2,75	3	6,57	3
R ²	0,68	3	0,77	2	0,74	2	0,77	2	0,76	2	0,74	2
CRM	22,87	3	7,82	2	6,09	3	2,94	2	2,13	2	2,79	2
CA	0,96	1	0,87	1	0,84	1	0,66	1	0,53	2	0,64	1
EF	0,37	2	0,56	2	0,49	2	0,56	2	0,55	3	0,49	2
$\sum Vp$ K-L	12		10		11		10		12		10	
Modelo de Horton												
β (10 ⁻³)	59,1		58,3		60,0		60,9		60,9		61,7	
EPE	0,12	2	0,71	2	0,74	2	0,17	2	1,15	2	0,71	2
R ²	0,95	1	0,99	1	0,98	1	0,99	1	0,99	1	0,98	1
CRM	5,22	2	13,09	3	12,48	2	7,01	3	3,88	3	7,29	3
CA	0,07	2	0,24	2	0,31	2	0,65	2	0,82	1	0,64	1
EF	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	-0,01	1	0,00	1
$\sum Vp$ H	8		9		8		9		8		8	
Modelo de Philip												
b	52,90		34,98		31,35		30,56		31,74		26,78	
k	14,98		70,00		82,62		89,88		80,00		98,33	
EPE	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
R ²	0,74	2	0,74	3	0,74	2	0,74	3	0,74	3	0,74	2
CRM	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1	0,00	1
CA	17,54	3	6,20	3	4,45	3	2,32	3	1,71	3	2,09	2
EF	0,94	3	0,84	3	0,78	3	0,57	3	0,42	2	0,52	3
$\sum Vp$ P	10		11		10		11		10		9	

A taxa de infiltração inicial na pastagem e no sistema de plantio direto foi praticamente constante ao longo das épocas avaliadas. Esse padrão é observado em solos com cobertura vegetal e, possivelmente à maior quantidade de água armazenada no solo antes dos testes (Figura 12). Contudo, o tempo para início do escoamento foi crescente ao longo das avaliações (Figura 6), o que favoreceu maior infiltração de água, em relação ao SE e PC. As taxas iniciais de infiltração de água no solo nos sistemas plantio direto (PD) e pastagem (PA) foram iguais, ($p < 5\%$), em todas as épocas estudadas (Figura 12). De outro modo, as taxas infiltradas inicialmente nos sistemas solo exposto (SE) e soja sob plantio convencional (PC) foram iguais apenas no primeiro dia (0) e aos 60 DAS.

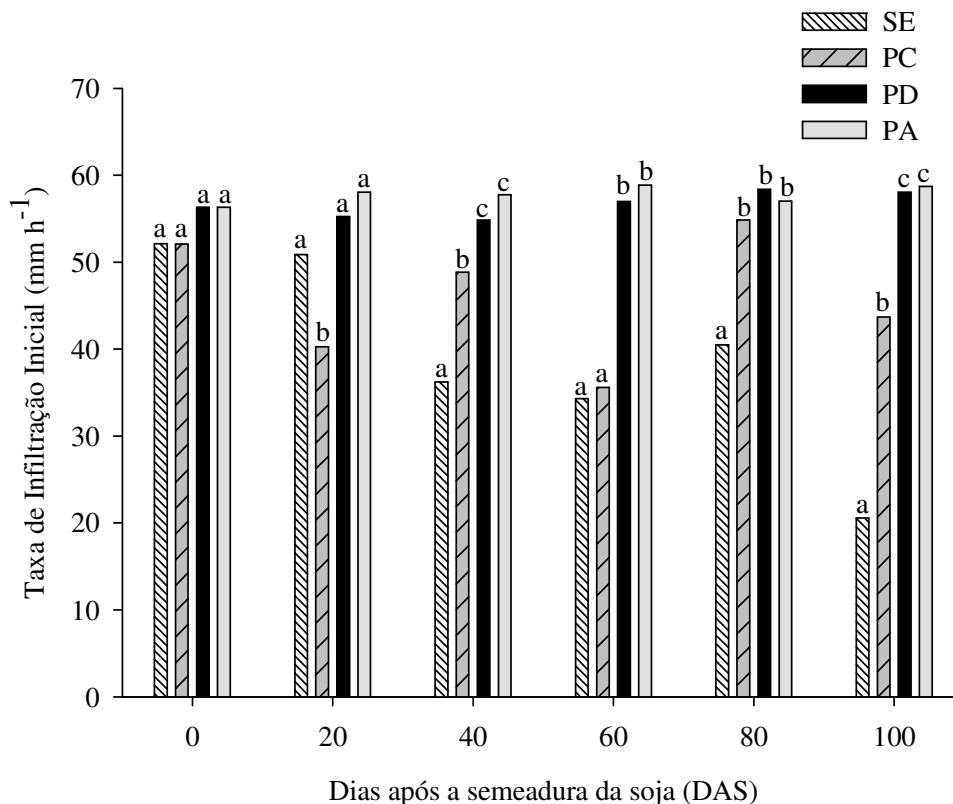


Figura 12. Taxa de infiltração inicial (i_0) de água no solo (mm h^{-1}) ao longo das épocas avaliadas (dias após a semeadura da soja - DAS) nos quatro sistemas de cultivo em Argissolo Vermelho distrófico para os sistemas e épocas avaliadas. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

A taxa de infiltração estável (TIE) de água no solo foi igual entre os sistemas com revolvimento do solo (SE e PC) e entre os sistemas conservacionistas (PD e PA) nas três primeiras etapas. A partir dos 40 DAS a taxa de infiltração estável de água no solo de PD foi maior que as demais. De outro modo, aos 60 DAS as taxas de SE, PC e PA foram iguais ($p < 0,05$). Aos 80 DAS a taxa de água estável foi igual em PA e PC, e maior que aquela quantificada em SE. Aos 100 DAS a taxa em SE e PC foi igual e menor que aquela da pastagem (PA). Contudo a TIE na pastagem foi menor que aquela do sistema soja sob plantio direto, o que indicou que este sistema favoreceu maior infiltração de água no solo (Figura 13).

Na pastagem, a partir dos 60 DAS foi obtida TIE inferior àquela verificada no sistema de plantio direto (Figura 13). A massa vegetal e a arquitetura da pastagem criaram caminho de escoamento preferencial para a água, favorecendo maior volume escoado em superfície.

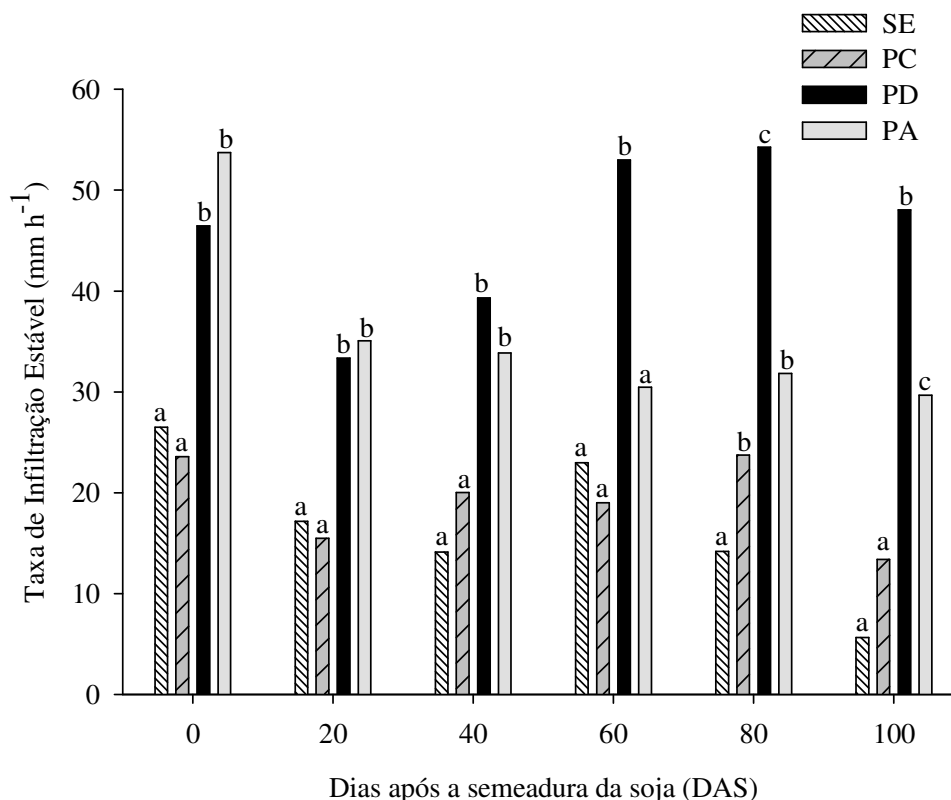


Figura 13. Taxa de infiltração estável (i_f) de água no solo (mm h^{-1}) ao longo das épocas avaliadas (dias após a semeadura da soja - DAS) nos quatro sistemas de cultivo em Argissolo Vermelho distrófico para os sistemas e épocas avaliadas. (Skott-Knott, $p < 0,05$).

A taxa de infiltração estável de água no solo exposto foi semelhante ao valor do sistema de preparo convencional do solo no período de estudo, com exceção daquela obtida aos 80DAS. Assim, pode-se afirmar que em sistemas de cultivo sob preparo convencional, que predominam no Brasil, o movimento de água no solo e sua interação com os atributos físicos é influenciado pelo preparo do solo, embora a soja tenha influenciado a taxa de infiltração em PC, sobretudo aos 80 DAS. Deste modo, no estágio inicial e final de desenvolvimento das culturas agrícolas a suscetibilidade do solo à ação erosiva das chuvas é grande. Neste estudo este efeito foi minimizado com a presença de cobertura vegetal, da cobertura da soja verificado a partir dos 40 DAS, onde se obteve aumento da taxa de infiltração estável de água no solo. A presença de cobertura vegetal sobre o solo dissipa a energia terminal das gotas de chuva. Assim, ao chegar ao solo com velocidade menor, a água tende a escoar mais lentamente e, ainda permanecer por maior período de tempo na superfície. Esse efeito da cobertura vegetal é intensificado em PD, pois os resíduos culturais sobre o solo atuam como barreira física ao escoamento da água e aumentam a retenção de água em pequenas depressões da superfície. Nessas depressões há aumento do gradiente hidráulico e favorecimento da infiltração de água no solo.

Durante as etapas de avaliação a taxa estável de infiltração de água no solo nos sistemas plantio direto e pastagem foi maior que aquelas obtidas nos demais tratamentos. Em média na pastagem foi 129,68% e 79,74% maior que o solo exposto e cultura da soja em sistema de preparo convencional, respectivamente. Por sua vez, no plantio direto esses valores foram 235,01% e 148,84%, respectivamente, quando comparados ao solo exposto e preparo convencional.

Até os 20 DAS se obteve valores de taxa de infiltração estável de água na pastagem, em média 15,83% superiores aqueles verificados no plantio direto. Entretanto, a partir dos 40 DAS houve inversão dessa relação, em média 74,77%. Isto se deve ao desenvolvimento da cultura da soja, maior teor de água armazenada no tratamento pastagem (Tabela 3) e aos resíduos culturais do milho sobre a superfície do solo atuando como barreira física ao escoamento da água. As poças formadas proporcionam maior infiltração de água no solo.

Verificou-se combinação entre época e sistema de cultivo ($p < 5\%$), considerando os efeitos combinados época e sistemas de cultivo na taxa de infiltração de água no solo, inicial e final foi avaliado.

4.6 CONCLUSÕES

A taxa de infiltração é mais influenciada pela cobertura vegetal do que pelo sistema de preparo do solo.

O efeito inicial do preparo mascara o efeito da cobertura vegetal conforme constatado nos sistemas solo exposto e soja sob cultivada sob preparo convencional do solo.

O modelo de Horton é o mais adequado para estimar a taxa de infiltração de água no solo em sistemas com cobertura vegetal do solo sem revolvimento do solo. O modelo de Philip é o melhor desempenho em condições de revolvimento de solo, com ou sem cobertura vegetal.

5. CONCLUSÕES GERAIS

A redução da erosão do solo em sistemas agrícolas de cultivo está associada à adoção de práticas de manejo que não revolvem o solo associadas a altos índices de cobertura vegetal, visto que a redução do índice de cobertura vegetal associado ao revolvimento do solo promove a desagregação do solo pela ação de chuvas.

A taxa de infiltração de água no solo é mais influenciada pela cobertura vegetal do que pelo sistema de preparo do solo. Contudo, o efeito inicial do preparo oculta o efeito da cobertura vegetal conforme constatado nos sistemas solo exposto e soja cultivada sob preparo convencional do solo.

O modelo de Horton é o mais adequado para estimar a taxa de infiltração de água no solo em sistemas com cobertura vegetal e sem revolvimento do solo. O modelo de Philip se ajusta melhor em condições de revolvimento de solo, com ou sem cobertura vegetal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUDI, I.; CARMI, G.; BERLINER, P. Rainfall simulator for field runoff studies. *Journal of Hydrology*, v.76-81, p.454-455, 2012.
- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E. & HOLT, R.F. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. USDA, Conservation Research Report, v.7, p.1-14, 1966.
- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E. & HOLT, R.F. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.31, p.550-556, 1967.
- ALVAREZ-MOZOS, J.; MIGUEL ANGEL, C.; GIMENEZ, R.; CASALI, J. & LEIBAR, U. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage. *Soil & Tillage Research*, v.111, p.142-153, 2011.
- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P.A. & PRUSKI, F.F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.337-344, 2002.
- ALVES SOBRINHO, T.; MACPHERSON, H.G.; GÓMEZ, J.A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. *Soil Use Management*, v.24, p.163-170, 2008.
- ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M. CARVALHO, D.F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, p.191-196, 2003.
- ASSOULINE, S. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, v.49, p.1-18, 2013.
- BAQUERO, J.E.; RALISCH, R.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F. Propriedades físicas do solo e crescimento radicular de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.1, 2012.
- BERTOL, I.; AMARAL, A. J.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A.; BARBOSA, F. T. & BRIGNONI, L. F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.543-553, 2006.
- BERTOL, I.; SCHICK, J. & BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para milho e aveia em rotação com outras culturas em três tipos de preparo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.545-552, 2002.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 8^a ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355 p.

BURWELL, R. E.; ALLMARAS, R. R.; AMEMIYA, M. A. Field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Science Society Processes*, v.27, p.697-700, 1963.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregados e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.14, n.1 p.99-105, 1990.

CARVALHO, D.F.; CRUZ, E.S.; PINTO, M.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p.3-9, 2009.

CARVALHO, D.F.; MACHADO, R.L.; EVANGELISTA, A.W.P.; KHOURY JÚNIOR, J.K.; SILVA, L.D.B. Distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno dos índices de erosividade EI_{30} e $KE > 25$ em Seropédica-RJ. *Engenharia Agrícola (Impresso)*, v.30, p.245-252, 2010.

CASTRO, M.A.; CUNHA, F.F.; LIMA, S.F.; PAIVA NETO, V.B.; LEITE, A.P.; MAGALHÃES, F.F.; CRUZ, H.M.G. Atributos físico-hídricos do solo ocupado com pastagem degradada e floresta nativa no Cerrado Sul-Matogrossense. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium*, Ituiutaba, v.3, p.498-512, 2012.

CERDÀ, A. Rain simulators and their application to geomorphology: state of the art. *Cuadernos de Información Geográfica*, 25, p.45-84, 1999.

COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage induce roughness and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette, Purdue University, 1981. 346p (Tese de Mestrado).

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. & FOSTER, G.R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Science Society of America Journal*, v.48, p.368-373, 1984.

CORSINI, P.C. & FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.289-298, 1999.

CRUZ, E.S.; CARVALHO, D.F.; VARELLA, C.A.A.; SILVA, L.D.B.; SOUZA, W.J.; PINTO, F.A.C. Comparação de classificadores de imagens digitais na determinação da cobertura do solo. *Engenharia Agrícola*, v.28, n.2, p.237-244, 2008.

DARBOUX, F. & HUANG, C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers ? *Soil Science Society of America Journal*, v.69, p.748-756, 2005.

EDUARDO, E.N.; CARVALHO, D.F.; MACHADO, R.L.; SOARES, P.F.C.; ALMEIDA, W.S. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em Argissolo Vermelho-Amarelo, sob condições de chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.796-803, 2013.

ELTZ, F.L.F.; MEHL, H.U.; REICHERT, J.M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.485-493, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2ª. ed. Rio de Janeiro, Embrapa, 1997. 212p.

ENGEL, F.L.; BERTOL, I.; RITTER, S.R.; PAZ GONZÁLEZ, A.; PAZ-FERREIRO, J. & VIDAL VÁZQUEZ, E. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. *Soil & Tillage Research*, v.103, p.216-221, 2009.

FERRO, V. Deducing the USLE mathematical structure by dimensional analysis and self-similarity theory. *Biosystems Engineering*, Oxford, v. 106, n. 2, p. 216–220, 2010.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI units. *Journal of Soil and Water Conservation*, Baltimore, v.36, p.355-359, 1981.

GUZHA, A.C. Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. *Soil & Tillage Research*, v.76, p.105-114, 2004.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados, MS, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.21, n.4, p.667-676, 1997.

HUANG J.; WU P.; ZHAO X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, v.104, p.93-102, 2013.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. *Applied multivariate statistical analysis*. 4ª ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999. 815 p.

KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKANEN, J.; IVERSEN, N.V.; DOUGLAS, J.T. & GONZÁLES, A.P. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Science Society American Journal*, v.64, p.1749-1758, 2000.

KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Part 1. p.425-442, 1986.

KINNELL, P.I.A. Event soil loss, runoff and the universal soil loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, v.385, p.384-397, 2010.

KUIPERS, H. A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. Journal Agriculture Science*, 5:255-262, 1957.

LAL, R.; DELGADO, J.A.; GROFFMAN, P.M.; MILLAR, N.; DELL, C.; ROTZ, A. Management to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.66, p.276-285, 2011.

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

MACHADO R.L.; CARVALHO, D.F.; ROUWS, J.R.C.; GOMES, D.P. & EDUARDO, E.N. Erosividade das chuvas associada a períodos de retorno e probabilidade de ocorrência no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.529-547, 2013.

MARIOTI, J.; BERTOL, I.; RAMOS, J.C.; WERNER, R.S.; PADILHA, J.; BANDEIRA, D.H. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1361-1371, 2013.

MELLO, E.L.; BERTOL, I.; ZAPAROLLI, V.; CARRAFA, M.R. Perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo de um Nitossolo Háplico submetido à chuva simulada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.901-909, 2003.

MORIN, J.; GOLDBERG, D. & SEGNER, I. A rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions of the American Society of Agriculture Engineering*, v.10, p.74-79, 1967.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M.A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.261-268, 2006a.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M.A. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.28, p.129-137, 2006b.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; URCHEI, M.A. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.443-451, 2010.

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

PRADO, E.A.F.; VITORINO, A.C.T.; OLIVEIRA, W.H.; ESPINDOLA, D.L.P.; ARANTES, H.P. Índice de dispersão de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana sob aplicação de vinhaça. *Semina: Ciências Agrárias*, v.35, n.4, p. 2347-2356, 2014.

PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Ed. SAEAFS. Curitiba, 1996.

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

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, v.102, p.242-254, 2009.

RÖMKENS, M.J.M. & WANG, J.Y. Effect of tillage on soil roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.29, p.429-433, 1986.

ROSA, J.D.; COOPER, M.; DARBOUX, F.; MEDEIROS, J.C. Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariograma-based index. *Soil & Tillage Research*, v.124, p.226-232, 2012.

SANTOS, M.A.N.; PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUES, D.B.B. Water infiltration in an Ultisol after cultivation of common bean. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.1143-1152, 2014.

SCHIAVO, J.A.; PEREIRA, M.G.; MIRANDA, L.P.M.; NETO, A.H.D.; FONTANA, A. Caracterização e classificação de solos desenvolvidos de arenitos da formação Aquidauana-MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.4, p.881-889, 2010.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A. A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.2, p.427-436, 2000.

SCHNEIDER, P.R.; TONINI, H. Utilização de variáveis Dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* De Wild. *Ciência Florestal*, v.13, p.121-129, 2003.

SHUKLA, M.K.; LAL, R.; OWENS, L.B. & UNKEFER, P. Land use management impacts on structure and infiltration characteristics of soils in the north Appalachian region of Ohio. *Soil Science*, v.168, p.167-177, 2003.

SILVA, C.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F. Atributos físicos, químicos e erosão entressulcos sob chuva simulada, em sistemas de plantio direto e convencional. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.1, p.144-153, 2005.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S. & CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, n.3, p. 271-278, 2005.

STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil & Tillage Research*, v.99, p.4-48, 2008.

THIERSCH, A. Efficiency of Diameter Distributions Prognosis for the Production of *Eucalyptus camaldulensis*. Dissertation Masters in Sciences Forestry, Federal University of Lavras, Lavras, 1997.

VAHABI J. & NIKKAMI D. Assessing dominant factors affecting soil erosion using a portable rainfall simulator. *International Journal of Sediment Research*, v.23, p.376-386, 2008.

VARELLA, C.A.A.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D.M.; SENA JÚNIOR, D.G. Determinação da cobertura do solo por análise de imagens e redes neurais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.225-9, 2002.

VIEIRA, M.J.; COGO, N.P.; CASSOL, E.A. Perdas por erosão em diferentes sistemas de preparo do solo para a cultura da soja (*Glycine max* L.) em condições de chuva simulada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.2, p.209-214, 1978.

WAGNER, L.E. Profile meter program. Documentation. United States. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Wind Erosion Research Unit. 27p. 1992.

WAGNER, L.E. & YIMING Y. Digitization of profile meter photographs. Transaction American Society Agricultural Engineers v.43 (2): 412-416, 1991.

WAGNER, C.S.; MASSAMBINI, O. Análise da relação intensidade de chuva: energia de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.12, p.197-203, 1988.

WILLMOTT, C.J.; ACKELSON, S.G.; Davis RE. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal Geophysical Research, v.90, 1985.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537).