

**CARLOS ALBERTO CECATTO**

**MODELAGEM DAS PERDAS DE SOLO E ÁGUA POR EROSÃO  
HÍDRICA PLUVIAL**

Tese apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Doutor no  
Curso de Pós-Graduação em Manejo do  
Solo da Universidade do Estado de  
Santa Catarina – UDESC.

**Orientador:** Dr. David José Miquelluti

**Co-orientador:** Dr. Eloy Lemos de  
Mello

**Co-orientador:** Dr. Ildegardis Bertol

**LAGES, SC  
2014**

C387m

Cecatto, Carlos Alberto

*Modelagem das perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial / Carlos Alberto Cecatto. - Lages, 2014.*

130 p. : il. ; 21 cm

*Orientador: David José Miquelluti*

*Coorientador: Eloy Lemos de Mello*

*Coorientador: Ildegardis Bertol*

*Bibliografia: p. 99-107*

*Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveteinárias, Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo, Lages, 2014.*

1. Modelagem. 2. Erosão hídrica. 3. Perdas de solo. 4. Produção de sedimentos. I. Cecatto, Carlos Alberto. II. Miquelluti, David José. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo. IV. Título

CDD: 631.45 - 20.ed.

**CARLOS ALBERTO CECATTO**

**MODELAGEM DAS PERDAS DE SOLO E ÁGUA POR EROSÃO  
HÍDRICA PLUVIAL**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

**Banca Examinadora:**

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. David José Miquelluti  
UDESC/Lages – SC

Co-orientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ildegardis Bertol  
UDESC/Lages - SC

Membros: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fabrício Tondello Barbosa  
UDESC/Lages – SC

\_\_\_\_\_  
Dr. Milton da Veiga  
EPAGRI/Campos Novos – SC

\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Luciane Costa de Oliveira  
IFSC/Lages – SC

Lages/SC, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2014



Aos “Luiz’es” de minha vida.  
Ao meu irmão pelo exemplo,  
coragem e por tudo aquilo que lhe  
foi cerceado. Aos meus filhos, que  
hoje são a motivação e razão das  
minhas realizações e por tudo  
aquilo que virão a ser.



## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS pela oportunidade de institucionalização do projeto de Doutorado e pela liberação das horas que foram fundamentais para a realização do trabalho.

Ao Prof. Eloy Lemos de Mello da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Campus Cascavel, pela co-orientação e pelas incontáveis horas dedicadas a este trabalho. Existem pessoas importantes, mas você foi fundamental. Obrigado pela orientação e amizade.

Ao Prof. Ildegardis Bertol, pela gentileza em ceder seus dados experimentais, fundamentais para as simulações, mas também por estar sempre disponível para ouvir. Obrigado pela orientação e amizade.

Ao Prof. David José Michelluti pela competente orientação deste trabalho, pela escolha do tema e por ter compartilhado comigo suas experiências. Agradeço pela convivência e pelos laços de amizade que construímos.

Aos amigos e colegas de trabalho Wagner Tenfen e Jair Wyzykowski pelas dicas e contribuições ao trabalho e especialmente ao Marcos Leandro Ohse, companheiro de disciplinas e projetos, que nas minhas ausências, foi sempre prestativo e assumiu a maior parte dos nossos trabalhos.

Agradecimento especial aos meus irmãos por acreditarem em mim, pelo apoio, pelo carinho e por estarem sempre por perto quando mais precisei.

Agradeço também a toda minha família, que não são poucos, pelo incentivo e pelo carinho.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento especial a minha esposa Cristiane Vieira Vidal, pelos longos anos de convivência, nem sempre harmônicos, e pela compreensão as inúmeras horas de minha ausência.



## **EPIGRAFE**

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobrir, no caminho incerto da vida, que o mais importante é decidir.”

Cora Coralina



## RESUMO

CECATTO, Carlos Alberto. **Modelagem das Perdas de Solo e Água por Erosão Hídrica Pluvial**. 2014. 130 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo – Área: Uso e Conservação do Solo e Recursos Naturais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages - SC, 2014.

Por volta de 1947, ELLISON, definiu a erosão do solo como um processo de desagregação e transporte de sedimentos por agentes erosivos, e que fatores envolvidos no processo deveriam ser estudados separadamente. A partir daí, uma série de modelos e equações matemáticas foram desenvolvidas para prever a erosão do solo. Num extremo, os modelos empíricos, semelhantes à Equação Universal de Perda de Solo – USLE, por considerar valores médios anuais de perdas de solo, são relativamente simples e requerem pouco esforço computacional. No entanto, apresentam algumas dificuldades quando se trata de extrapolação para cenários diferentes daqueles testados, além de não serem indicados para eventos individuais. Noutro extremo, os modelos matemáticos, com alto grau de complexidade, exigem grande esforço na geração dos dados de entrada e muito trabalho computacional no seu processamento. Embora seja desejável um modelo puramente físico, a quantidade de informações requeridas torna-o praticamente inviável, o que indica a adoção de um modelo intermediário entre puramente físico e empírico. Um modelo simplificado, proposto por Hartley (1987) para estimar o escoamento superficial, a produção de sedimentos e a perda de solo, pode ser uma alternativa neste universo. Este modelo, apesar de ter uma base física, requer um conjunto de dados similar àquele da USLE. A pesquisa tem como objetivo proceder à análise do modelo de Hartley, construir e adequar novas rotinas a serem incorporadas no modelo original e validá-lo em algumas situações reais. Os primeiros passos deste trabalho consistiram em buscar e organizar dados de perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial, oriundos da base de dados de conservação do solo e água disponíveis no CAV/UEDESC. As simulações do modelo foram realizadas com os dados obtidos em experimentos conduzidos em dois solos, um Nitossolo Háplico Alumínico e um Cambissolo Húmico Alumínico Léptico. O desempenho do modelo foi avaliado segundo o índice de confiança, o

qual sintetiza os resultados dos índices de concordância e de correlação. O modelo mostrou-se capaz de prever as perdas de água, com índices de correlação entre 0,75 e 0,91, semelhantes aos índices de concordância de 0,73 a 0,91. O desempenho do modelo variou de sofrível a muito bom. Para as perdas de solo, o modelo apresentou índices superiores, com valores de 0,96 e 0,95 para a correlação e a concordância, respectivamente. O desempenho do modelo, para as perdas de solo, foi considerado ótimo.

**Termos de Indexação:** Modelagem. Erosão Hídrica. Perdas de solo. Produção de sedimentos

## ABSTRACT

CECATTO, Carlos Alberto. **Modeling of Water and Soil Losses by Erosion Hydro Rain**. 2014. 130 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo – Área: Uso e Conservação do Solo e Recursos Naturais) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages - SC, 2014.

By 1947, Ellison, defined soil erosion as a process of breakdown and sediment transport by erosive agents, and factors involved in the process should be studied separately. From there, a series of models and mathematical equations were developed to predict soil erosion. At one extreme, empirical models, similar to Equation Universal Soil Loss Models - USLE, considering annual average soil loss, are relatively simple and require little computational effort. However, present difficulties when it comes to scaling for different scenarios of those tested, and are not indicated for individual events. At the other extreme, the mathematical models with a high degree of complexity, require great effort in the generation of the input data, and computational work in their processing. Although a purely physical model is desirable, the amount of required information makes it virtually impossible, suggesting the adoption of an intermediate model between purely physical and empirical. A simplified model proposed by Hartley (1987) to estimate runoff, sediment yield and soil loss can be an alternative in this universe. This model, despite a physical basis, requires a set of data similar to the USLE. The research aims to examine the Hartley model, build and adapt new routines to be incorporated in the original model and validate it in some real situations. The first steps of this work consisted in searching and organizing data on losses of soil and water by rainfall erosion, originating database for soil conservation and water available on CAV/UDESC. The simulations were performed with the data obtained in experiments conducted in two soils, clayey loam structured soil (*Hapludox*) and *Inceptisol*. The model performance was evaluated according to the confidence index, which summarizes the results of the indices of concordance and correlation.

The model proved capable of predicting water losses, with correlation coefficients between 0.75 and 0.91, similar to levels of concordance from 0.73 to 0.91. The performance of the model ranged from tolerable to very good. For soil loss, the model showed higher rates, with values of 0.96 and 0.95 for the correlation and concordance, respectively. The performance of the model for soil loss, had great values .

**Key-Words:** Modeling. Soil erosion. Soil loss. Sediment yield.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Profundidade dos horizontes e composição granulométrica do solo da área experimental I.....	43
Tabela 2 – Profundidade dos horizontes e composição granulométrica do solo da área experimental II. ....	44
Tabela 3 – Altura da lâmina de armazenamento nas microdepressões do solo ( $Z$ ), mm*. ....	57
Tabela 4 – Valores de parâmetros de infiltração de acordo com a classe textural.....	59
Tabela 5 – Distribuição do tamanho de partículas desagregadas e suas densidades.....	66
Tabela 6 – Critério de interpretação do desempenho do modelo, baseado no índice de concordância ( $c$ ).....	71
Tabela 7 – Índice de área foliar (IAF) e Interceptação máxima pela cobertura vegetal ( $I_{\max}$ ) para algumas culturas .....	74
Tabela 8 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões ( $Z$ ), lâmina de interceptação ( $I$ ) e lâmina total infiltrada ( $F$ ).....	79
Tabela 9 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	79
Tabela 10 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões ( $Z$ ), lâmina de interceptação ( $I$ ) e lâmina total infiltrada ( $F$ ).....	80
Tabela 11 – Perdas de água por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	81
Tabela 12 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões ( $Z$ ); lâmina de interceptação ( $I$ ); lâmina total infiltrada por Horton ( $F$ ); PAE: perdas de água estimadas pelo modelo (mm); PAO: perdas de água observadas no campo (mm). ....	82
Tabela 13 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões ( $Z$ ), lâmina de interceptação ( $I$ ) e lâmina total infiltrada ( $F$ ).....	83
Tabela 14 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	83

Tabela 15 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões ( $Z$ ), lâmina de interceptação ( $I$ ) e lâmina total infiltrada ( $F$ ). .....	84
Tabela 16 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	85
Tabela 17 – Capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ) e produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) .....	88
Tabela 18 – Perdas de solo estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	89
Tabela 19 – Capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ) e produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) .....	90
Tabela 20 – Perdas de solo estimadas pelo modelo e observadas no campo. ....	91
Tabela 21 – Coeficiente de correlação ( $R$ ), coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ) e índice de confiança ( $c$ ), para os dados de perda de água e solo para os experimentos 1 a 5. ....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo do processo de erosão hídrica .....	36
Figura 2 – Fluxograma indicando os experimentos que foram utilizados para a calibração e validação do modelo.....	54
Figura 3 – Representação esquemática do modelo simplificado.....	55
Figura 4 – Hidrograma admitido no Modelo Simplificado .....	60
Figura 5 – Fator cobertura vegetal, CF.....	68
Figura 6 – Nomograma para o fator de erodibilidade do solo.....	69
Figura 7 – Gráfico representando as equações de regressão ajustadas para as perdas de água para os experimentos 1 a 5 juntamente com a equação, valor p de probabilidade e poder explicativo ( $R^2$ ).....	86
Figura 8 – Gráfico representando as equações de regressão ajustadas para as perdas de solo para os experimentos 1 e 2 juntamente com a equação, valor p de probabilidade e poder explicativo ( $R^2$ ).....	92



## SUMÁRIO

1	Introdução .....	23
2	Revisão Bibliográfica.....	25
2.1	Erosão Hídrica do Solo .....	25
2.2	Ciclo Hidrológico.....	28
2.2.1	Precipitação.....	28
2.2.2	Infiltração.....	29
2.2.3	Interceptação.....	30
2.2.4	Armazenamento superficial .....	31
2.2.5	Escoamento superficial .....	32
2.3	Modelos de Predição de Erosão Hídrica .....	33
2.3.1	Modelos empíricos.....	34
2.3.2	Modelos fundamentais ou mecânicos.....	35
2.3.3	Sub modelos de erosão.....	37
3	Hipóteses.....	41
4	Objetivos .....	41
4.1	Objetivo Geral.....	41
4.2	Objetivos Específicos.....	41
5	Material e Métodos .....	42
5.1	origem dos Dados Experimentais.....	42
5.1.1	Área experimental I.....	42
5.1.2	Área experimental II .....	44
5.2	Unidade experimental .....	45
5.3	Aparelho simulador de chuvas .....	45
5.4	Experimentos Conduzidos na Área Experimental I... 45	
5.4.1	Experimento 1 .....	45

5.4.2	Experimento 2 .....	47
5.4.3	Experimento 3 .....	48
5.5	Experimentos Conduzidos na Área Experimental II .	52
5.5.1	Experimento 4 .....	52
5.5.2	Experimento 5 .....	53
5.6	Resumo dos experimentos .....	53
5.7	Desenvolvimento da Pesquisa .....	54
5.8	Modelo Matemático de Simulação .....	55
5.8.1	Base conceitual .....	55
5.8.2	Determinação da quantidade de escoamento superficial .....	56
5.8.3	Determinação do hidrograma de escoamento superficial .....	60
5.8.4	Determinação da capacidade de transporte de sedimentos .....	63
5.8.5	Capacidade de desagregação da chuva e do escoamento superficial .....	67
5.9	Índices de eficiência do modelo .....	70
5.10	Calibração e Validação .....	71
6	Resultados e Discussão.....	73
6.1	Proposta de Alteração/Inclusão ao modelo original ..	73
6.1.1	Lâmina de interceptação.....	73
6.1.2	Lâmina de armazenamento nas microdepressões .....	74
6.1.3	Lâmina total infiltrada .....	74
6.1.4	Parâmetro de resistência hidráulica .....	76
6.2	Perdas de Água .....	77
6.2.1	Perdas de água para os experimentos conduzidos na área experimental I .....	78
6.2.2	Perdas de água para os experimentos conduzidos na área experimental II .....	82

6.2.3	Equações de regressão e coeficiente de correlação para as perdas de água observadas e estimadas pelo modelo .....	85
6.3	Perdas de Solo.....	87
6.4	Análise da eficiência do modelo .....	92
7	Conclusões .....	96
8	Recomendações.....	98
9	Referências.....	99
	ANEXOS .....	108



## 1 INTRODUÇÃO

A relação da terra com o homem remonta os seus primórdios, quando este abandonou a sua condição nômade e se fixou. Iniciou aí uma relação de dependência que, com o passar dos anos, só aumentou. A necessidade do homem por produtos de origem agrícola tem ocasionado desequilíbrios nas relações entre ele e o sistema solo – água - atmosfera.

A premissa de que a água, e o solo são bens renováveis, principalmente no curto prazo, tem sido questionada. Esta mudança de concepção tem levado o homem a rever seus critérios de utilização e manutenção da água e do solo. O conhecimento da capacidade produtiva do solo e da qualidade da água superficial torna-se imprescindível para a sobrevivência de todas as espécies deste planeta.

A degradação do solo pelo uso e manejo inadequado acelera, entre outros problemas, a erosão do solo. Como consequência tem-se: a contaminação e o assoreamento dos mananciais de água; a redução da fertilidade do solo; o aumento nos custos de produção e o comprometimento da produção agrícola, ou, até a perda total da capacidade produtiva do solo, cuja recuperação muitas vezes não é viável economicamente.

O clima tropical e o manejo inadequado do solo aceleram a decomposição da matéria orgânica reduzindo a porosidade pelo aumento da compactação, diminuindo a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial e, como consequência, a erosão hídrica. O acelerado processo de erosão hídrica do solo induzido pelo homem é um problema amplamente reconhecido na maior parte do mundo, no entanto, é difícil de quantificar precisamente o volume e a taxa em que ocorre. As estimativas da erosão hídrica do solo são em geral incertas ou não disponíveis, o que justificaria a necessidade de pesquisas visando identificar os sistemas de manejo e cultivo do solo adequado para cada situação.

Modelos para estimar as perdas de solo e água têm sido desenvolvidos e sua aplicação para a realidade brasileira tem sido um desafio para os pesquisadores, dadas as grandes diferenças nas características de solo e clima, para os quais os modelos foram desenvolvidos.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho foi proceder à análise do modelo simplificado sugerido por Hartley (1987), além de

construir e adequar novas rotinas a serem incorporadas no modelo original e validá-las em algumas situações reais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EROSIÃO HÍDRICA DO SOLO

A erosão pode ser definida, simplesmente como o desgaste do solo, ocasionada pelos principais agentes erosivos diretos vento e a água e por indiretos como mudanças de temperatura, atividade biológica e gelo-degelo, classificadas como erosão hídrica (água), erosão eólica (vento) e erosão glacial (degelo). O processo de erosão hídrica compreende três fases básicas que podem ocorrer de forma individual ou conjuntamente, quais sejam: desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, ocasionadas pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e pelo escoamento superficial da água da chuva (ELLISON, 1947; HUDSON, 1981).

A desagregação é a separação de partículas primárias ou secundárias da massa de solo, tornando-as individuais e disponíveis para o transporte e ocorre principalmente pelo impacto das gotas de chuva e também pelo escoamento superficial. O transporte, por sua vez, compreende a apreensão e o movimento de sedimentos a partir do seu local de origem sobre a superfície do solo e ocorre principalmente pelo escoamento superficial e também pelo salpico das gotas de chuva na superfície do solo (HUDSON, 1981).

Os sedimentos produzidos são transportados por meio do fluxo superficial, canais e rios e podem alcançar o oceano. No entanto, nem todos os sedimentos produzidos alcançam o oceano. Uma parte deles, normalmente, é depositada ao longo do caminho nas áreas de declive. A deposição de sedimentos ocorre quando é excedida a capacidade de transporte do fluxo, caracterizando a sedimentação e pode ocorrer de forma definitiva ou temporária.

A erosão hídrica tem sua ocorrência em quatro formas: erosão entre sulcos, erosão em sulcos, erosão em voçorocas e erosão em cursos d'água. A erosão entre sulcos ocorre predominantemente pelo fluxo laminar turbulento nas áreas mais planas do terreno. As gotas de chuva são o agente erosivo mais importante nestas áreas, provocando a desagregação do solo e o transporte das partículas desagregadas é feito predominantemente pelo fluxo superficial turbulento. A erosão em sulcos ocorre em pequenos canais existentes na superfície do solo. É um processo hidráulico onde a força de cisalhamento do fluxo, na interface solo-água, desagrega e transporta as partículas de solo. A desagregação e o transporte se dão principalmente pelo escoamento

superficial que ocorre nestes canais. A erosão em voçorocas é uma forma de erosão em sulcos apenas em magnitude diferente. A erosão em cursos d'água compreende a remoção de materiais do solo de taludes e do leito dos cursos d'água. É um processo erosivo causado essencialmente pelo escoamento superficial. O fluxo superficial e em canais é o principal ajuste responsável pela erosão do solo. Embora o fluxo superficial seja tratado de uma forma geral como fluxo laminar, frequentemente ele se concentra em pequenos canais (FOSTER, 1982; FOSTER et al., 1985).

A erosão hídrica pluvial do solo é um fenômeno que ocorre naturalmente. No entanto, a ação humana pode intensificá-lo, situação presente na maioria das vezes. É um processo dispendioso para a sociedade e para a natureza e o seu conhecimento é extremamente importante na adoção de práticas conservacionistas e de manejo do solo.

A análise do processo de erosão do solo requer uma série de informações sobre as características do solo e dos agentes erosivos envolvidos, além da inter-relação entre os diversos processos físicos que implicam na desagregação e transporte das partículas de solo. A erosão hídrica do solo ocorre com intensidade variável e está condicionada a vários fatores que estão diretamente envolvidos.

As ações das forças erosivas provenientes do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e do escoamento superficial promovem a desagregação das partículas de solo, quando excedem a resistência do solo a erosão e dão a energia básica para iniciar o processo erosivo tornando-se os principais agentes hidrológicos envolvidos (FOSTER, 1982).

A capacidade de transporte é dependente das forças dos agentes de transporte (fluxo superficial e impacto das gotas de chuva), da transportabilidade das partículas de solo (tamanho e densidade dos sedimentos) e da presença de materiais (resíduos vegetais) que reduzem as forças de transporte. Segundo Ellison (1947) o transporte de partículas desagregadas é feito quase que exclusivamente pelo fluxo superficial turbulento. No entanto, isoladamente, tal fluxo tem capacidade de transporte limitado, porém associada ao impacto das gotas de chuva, essa capacidade aumenta consideravelmente.

Os fatores relacionados à topografia: comprimento, grau e forma do declive, basicamente modificam as entradas de energia dos fatores hidrológicos (FOSTER, 1982). As perdas de solo aumentam com o incremento da energia cinética de precipitação e da declividade

da superfície do solo. Aumentos nas perdas de solo são também verificados quando aumenta o comprimento de rampa. No entanto, as perdas de solo são mais sensíveis às mudanças na declividade do que as mudanças no comprimento de rampa (RENARD et al., 1985).

Alguns solos são naturalmente mais susceptíveis à erosão que outros, determinados pelas características do solo que definem a sua erodibilidade. A erodibilidade do solo apresenta grande variabilidade espacial e temporal, que pode ser explicada pela diversidade climática, a qual influi no potencial erosivo das chuvas, e na variabilidade de solo, o que influencia na susceptibilidade a erosão (BERTOL et al., 2002).

A cobertura do solo, por resíduos vegetais e pela copa das plantas, tem um grande efeito sobre a erosão. Materiais em contato com a superfície do solo são mais eficientes em reduzir a erosão que a cobertura vegetal. A cobertura residual do solo contribui para a redução da erosão entressulcos, pois aumenta a profundidade do fluxo superficial, reduz o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e diminui o fluxo superficial e a desagregação do solo (FOSTER, 1982; LEITE et al., 2004; SLONEKER et al., 1977; BRAIDA et al., 1999).

Os sistemas de manejo conservacionistas do solo, como a semeadura direta e cultivo mínimo, contribuem para aumentar a resistência do solo à erosão hídrica pois mantêm os resíduos culturais na superfície do solo ou semi-incorporados embora diminuam a rugosidade superficial; por sua vez, os preparos convencionais, que se caracterizam pela redução da cobertura do solo, aumentam a erosão hídrica do solo (MELLO, 2009; LEITE et al., 2004).

O estudo em separado desses processos permite o melhor entendimento dos mecanismos da erosão hídrica, facilitando o desenvolvimento de modelos, principalmente os fundamentais, que descrevam as perdas de solo e auxiliam no estudo de prática de controle de erosão e de conservação do solo (BRAIDA et al., 1996).

## 2.2 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico pode ser analisado dentro de um sistema fechado, uma vez que a quantidade de água disponível para a terra é considerada finita e indestrutível (VILLELA et al., 1975).

Dentre os ambientes ideais para estudos de conservação do solo, destaca-se a bacia hidrográfica, devido à simplicidade que oferece para o entendimento e aplicação do balanço hídrico. Hidrologicamente, uma bacia hidrográfica pode ser conceituada como sendo uma área definida topograficamente, e que apresenta fluxo superficial, canais e fluxo sub-superficial e que é drenada através de uma única saída (VILLELA et al., 1975; FOSTER, 1982).

Os processos hidrológicos chuva e escoamento superficial são, individualmente ou combinados, os causadores de erosão e controlam as fases de desagregação, transporte e sedimentação. Assim, as características da precipitação e do escoamento superficial afetam de maneira completa a erosão. Portanto, uma análise da erosão, compreendendo a produção ou transporte de sedimentos, deve levar em consideração os principais processos hidrológicos, segundo Huggins (1979).

Basicamente, um modelo hidrológico aplicado ao estudo da erosão do solo deve contemplar o comportamento do escoamento superficial a partir do conhecimento das características da precipitação e das propriedades físicas do solo (ROSE, 1985). No entanto, para este tipo de análise, é fundamental levar em conta e entender a interação dos demais processos do ciclo hidrológico.

Os principais processos do ciclo hidrológico que devem ser considerados em estudos dessa natureza são a chuva ou precipitação, a infiltração de água no solo, a interceptação pela cobertura do solo, o armazenamento superficial no solo e o escoamento superficial (HUGGINS, 1979; BEASLEY, 1980).

### 2.2.1 Precipitação

A precipitação pode ser definida como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, independente do estado em que a água se encontra. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitação. O que diferencia essas formas de precipitação é o estado em que a água se encontra (TUCCI et al., 1993).

A precipitação é um dos fatores que mais afeta o ciclo hidrológico e, por isso, o conhecimento das características da chuva é fundamental para a previsão do escoamento superficial, da distribuição da água no solo e da própria erosão hídrica. As características principais da precipitação são o seu total, duração e distribuição temporal e espacial. Elas definem, em grande parte, o efeito da precipitação sobre a infiltração da água no solo, sobre o escoamento superficial e sobre a erosão hídrica. Podem ainda ser incluídos o período de retorno e a distribuição da intensidade no tempo. Estas últimas são importantes na construção de obras mecânicas de controle da erosão e planejamentos conservacionistas, como o terraceamento (TUCCI et al., 1993).

### **2.2.2 Infiltração**

Infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, podendo ou não mover-se para baixo por percolação em direção ao lençol freático (WISLER et al., 1964).

O conhecimento do processo de infiltração é importante para a adoção de práticas de controle da erosão e conservação do solo, pois ela comanda o escoamento superficial e é responsável direta pela erosão hídrica (BRANDÃO et al., 2006).

A taxa de infiltração representa a lâmina de água que atravessa a superfície do solo por unidade de tempo sempre que há água disponível para isso, enquanto, a capacidade de infiltração representa o potencial que o solo tem para absorver água pela superfície sob condição de alagamento. A taxa de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo valor constante, denominado capacidade de infiltração. A capacidade de infiltração somente será igual à taxa de infiltração quando o aporte superficial de água, precipitado ou proveniente de outra área, tiver intensidade superior à capacidade de infiltração (TUCCI et al., 1993; LIBARDI, 1995).

Os fatores que afetam a infiltração da água no solo podem ser divididos em quatro categorias: fatores relacionados ao solo (propriedades físicas, químicas e mineralógicas); fatores relacionados à superfície (tipo de cobertura do solo); fatores dependentes do preparo e manejo do solo e outros fatores (processos naturais) (RAWLS et al., 1996)

A quantificação do movimento de água no perfil do solo pode ser estimada por modelos teóricos ou empíricos. Os modelos teóricos

tem embasamento na física do escoamento em meio poroso e são baseado na equação de Darcy, a partir da qual a equação de Richards foi concebida. O modelo de Green-Ampt, desenvolvido a partir da equação de Darcy, é um dos modelos teóricos mais empregados na estimativa de infiltração de água no solo. Seus principais pressupostos são a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo e a existência de um solo com perfil homogêneo e profundidade infinita. O modelo se aplica nas condições em que o solo é quem limita a infiltração. Uma modificação do modelo de Gren-Ampt, proposta por Mein e Larson em 1973, denominado modelo de Grem-Ampt modificado por Mein e Larson (GAML), mantém os mesmos pressupostos, no entanto, inclui condições anteriores ao empoçamento da água na superfície do solo (BRANDÃO et al., 2006).

Um dos primeiros modelos empíricos, e dos mais utilizados para dimensionamento de irrigação, foi proposto por Kostiakov. Tal modelo apresenta o inconveniente de a taxa de infiltração tender a zero quando o tempo é infinito. Uma alteração ao modelo de Kostiakov foi proposta por Lewis que buscava resolver tal inconveniente. No novo modelo, denominado Kostiakov-Lewis ou Kostiakov modificado, quando o tempo tende para o infinito a taxa de infiltração se aproxima de uma constante. Outro modelo também empírico, porém mais consistente que o modelo de Kostiakov, foi proposto por Horton. Neste modelo, a redução na taxa de infiltração em função do tempo é fortemente influenciada por fatores que ocorrem na superfície do solo, como o encrostamento superficial, provocado pelo impacto das gotas de chuva, e a contração e expansão do solo. O modelo de Horton contém coeficientes que podem ser determinados por regressão a partir de dados de infiltração medidos no campo (BRANDÃO et al., 2006).

A infiltração de água no solo é o componente hidrológico mais importante na determinação da forma e características do hidrograma de uma bacia hidrográfica (HUGGINS, 1979; SMITH, 1981).

### **2.2.3 Intercepção**

Intercepção é o processo pelo qual a água não atinge diretamente a superfície do solo, podendo armazenar água na superfície das plantas e também em outros materiais que estão na superfície do solo. É influenciada pelo tipo, densidade e estágio de

crescimento da vegetação (variação da densidade foliar), estação do ano e velocidade do vento (condições climáticas) e de características da própria vegetação (HUGGINS, 1979; BEASLEY, 1980; TUCCI, 1993).

Conforme Beasley (1980), geralmente, a interceptação tem um papel insignificante no consumo de água na maioria das precipitações, no entanto, seu efeito relativo pode ser bastante significativo, quando é baixo o volume de precipitação. Segundo Tucci (1993), nos modelos conceituais a interceptação tem sido tratada como um reservatório com capacidade máxima, de acordo com o tipo de cobertura.

A interceptação pela cobertura vegetal apresenta grande importância na dissipação da energia cinética das gotas de chuva, principalmente nas regiões onde ocorre a erosão laminar (entressulcos), na medida em que a cobertura evita o impacto direto das gotas sobre a superfície do solo, minimizando o transporte de partículas pelo escoamento laminar, e também, a sua ação de desprendimento de partículas que dá origem ao processo erosivo (SILVA et al., 2005).

#### **2.2.4 Armazenamento superficial**

O armazenamento superficial é dependente da microtopografia da superfície do solo, e é influenciado, principalmente, pela rugosidade do solo e pela declividade da área que, por sua vez, estão sujeitas as mudanças espacial e temporal. Operações de preparo produzem mudanças abruptas na rugosidade que é gradualmente diminuída com o efeito da chuva (EVANS, 1980; KAMPHORST et al., 2000; BERTOL et al., 2006).

A rugosidade superficial é responsável pelo armazenamento de água na superfície do solo e pela retenção de sedimentos, o que contribui para a diminuição da erosão hídrica do solo. Ela é dependente do tipo de preparo do solo. Por exemplo, no cultivo mínimo observam-se maiores valores de rugosidade superficial comparativamente ao preparo convencional e, este, por sua vez, apresenta maiores valores do que a semeadura direta e do que o solo sem cultivo. Assim, nos sistemas de manejo conservacionistas, com exceção da semeadura direta, a rugosidade superficial do solo é maior do que nos sistemas convencionais. Em alguns casos, no entanto, a semeadura direta pode apresentar rugosidade superficial relativamente

alta, por causa dos resíduos vegetais remanescentes dos cultivos anteriores (BERTOL et al., 2006).

Uma quantidade significativa de água pode ser retida nas microdepressões, influenciando as características de drenagem e escoamento superficial da área (BEASLEY, 1980).

### **2.2.5 Escoamento superficial**

Subtraídos os volumes de interceptação, de infiltração e de retenção superficial, o excesso de água da chuva tende a escoar-se superficialmente (HUGGINS, 1979). A partir disso, supondo-se uma taxa de precipitação constante, a taxa de escoamento aumenta gradativamente com o tempo até atingir o pico, permanecendo constante até que a chuva cesse (BEASLEY, 1980).

Os fatores que afetam especificamente a taxa de escoamento superficial são a rugosidade hidráulica, a declividade do terreno e a profundidade da lâmina de fluxo dependente da lâmina de chuva (FOSTER, 1982).

Conforme Kilinc et al. (1973), o escoamento superficial é variável no espaço e no tempo, tornando-se difícil predizê-lo por meio de um modelo hidráulico. A lâmina de escoamento pode variar com a taxa de fluxo e a natureza da superfície, e o fluxo pode ser laminar ou turbulento, ou ambos.

Estudos de laboratório têm demonstrado que o fator de fricção, o número de Reynolds, o impacto das gotas de chuva e o fluxo superficial sobre uma superfície lisa se relacionam entre si. Baixos valores do número de Reynolds representam um fluxo laminar enquanto valores mais altos relacionam-se ao fluxo turbulento (FOSTER et al., 1974).

## 2.3 MODELOS DE PREDIÇÃO DE EROÇÃO HÍDRICA

A complexidade do fenômeno de erosão hídrica é tão grande e indica que, inicialmente, qualquer modelo destinado a descrevê-lo deve traduzir uma simplificação igualmente grande da realidade, levando em consideração apenas seus principais componentes, enquanto, os detalhes serão adicionados à medida que se tornarem conhecidos.

Segundo Tucci (2005), o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. O modelo, por si só, não é um objetivo, mas uma ferramenta para atingir um objetivo, que é ajudar a entender e representar o comportamento de fenômenos observados.

Os modelos podem ser classificados segundo vários critérios, encontrados na literatura: quanto à memória (o quanto do passado afeta o estado presente); quanto à linearidade (validade do princípio da superposição); quanto à variabilidade espacial (se concentrado ou distribuído); quanto à variabilidade temporal (se contínuo ou discreto); quanto à chance de ocorrência de determinada variável (estocástico ou determinístico) e quanto às funções utilizadas (se conceitual ou empírico) (TUCCI, 2005).

As pesquisas em erosão hídrica tem se concentrado principalmente em obter dados para satisfazer os modelos empíricos e conceituais. Os primeiros, mais comuns, são baseados puramente na experimentação. São os denominados modelos empíricos que se utilizam de um relacionamento estatístico entre resultados conhecidos e um determinado conjunto de variáveis independentes, por meio de equações de regressão. As funções construídas, a princípio, não tem qualquer relação com os processos físicos envolvidos no fenômeno de erosão. Os segundos pretendem descrever matematicamente as características estruturais, bem como os processos que interferem na erosão. Ainda, segundo Tucci (2005), alguns autores subdividem os modelos conceituais em semiconceituais (modelos de base física com certas relações empíricas) e físicos (utilizam-se de equações diferenciais do sistema físico).

A predição da erosão hídrica por modelos empíricos ou conceituais tem sua aplicação no planejamento do uso e manejo do solo agrícola e ambiental, pois permite comparar as perdas de solo

observadas com a tolerância permitida para cada tipo de solo (BERTOL et al., 2001).

### 2.3.1 Modelos empíricos

O surgimento dos modelos empíricos para estimar as perdas de solo por erosão ocorreu nos Estados Unidos, por volta de 1940. A primeira equação apresentada relacionava a taxa de perda de solo ao grau e comprimento do declive (WISCHMEIER et al., 1978). No ano seguinte, Smith (1941) adicionou ao modelo fatores relativos às culturas e práticas conservacionistas. Também introduziu o conceito de um limite específico de perda de solo, desenvolvendo um método gráfico para recomendar práticas conservacionistas em alguns tipos de solo. Mais tarde, foram adicionados fatores referentes ao solo e manejo (WISCHMEIER et al., 1978). Simultaneamente ao aperfeiçoamento deste modelo, faziam-se descobertas relacionadas à ação da chuva no processo erosivo. A ação do impacto das gotas de chuva sobre o solo foi constatada a partir dos estudos de chuva natural (DULEY, 1940; LAWS, 1940) e da análise da ação mecânica das gotas de chuva (ELLISON, 1947)

Da integração destas novas informações aos dados já existentes surgiu a equação conhecida como equação de *Musgrave* ou equação declividade-prática conservacionista (MITCHELL et al., 1980). Esta equação foi a primeira a introduzir um fator que expressava o efeito de variações de precipitação. A equação de *Musgrave* foi utilizada nos Estados Unidos, por aproximadamente 10 anos, sendo então substituída no final da década de 50 pela primeira versão da Equação Universal de Perda de Solo (USLE).

A USLE foi desenvolvida a partir da análise de dados em erosão hídrica do solo disponíveis nos Estados Unidos pelo *Agricultural Research Service* em cooperação com a Universidade de Purdue (WISCHMEIER et al., 1978). Foi denominada “Universal” em função de sua estrutura permitir sua aplicação em todos os lugares onde pudessem ser obtidos dados apropriados.

A equação possibilita prever a perda média anual de solo por erosão hídrica ( $A$ ), com base nos fatores locais que influenciam a erosão: erosividade de chuva combinada com o escoamento superficial (fator  $R$ ), susceptibilidade natural do solo à erosão (fator  $K$ ), associação entre comprimento de rampa e percentual de declividade (fator  $LS$ ), sistemas de produção, de manejo e de cobertura

do solo (fator  $C$ ) e práticas de suporte de controle da erosão (fator  $P$ ). A multiplicação destes seis fatores obtidos isoladamente fornece o valor quantitativo da erosão estimada. A equação tem a forma:

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

Apesar de a USLE ter representado um grande avanço nas predições de perda de solo, por ser um modelo empírico e, portanto, dependente dos dados usados na sua derivação, sua aplicação geográfica e os propósitos da equação sofrem algumas limitações.

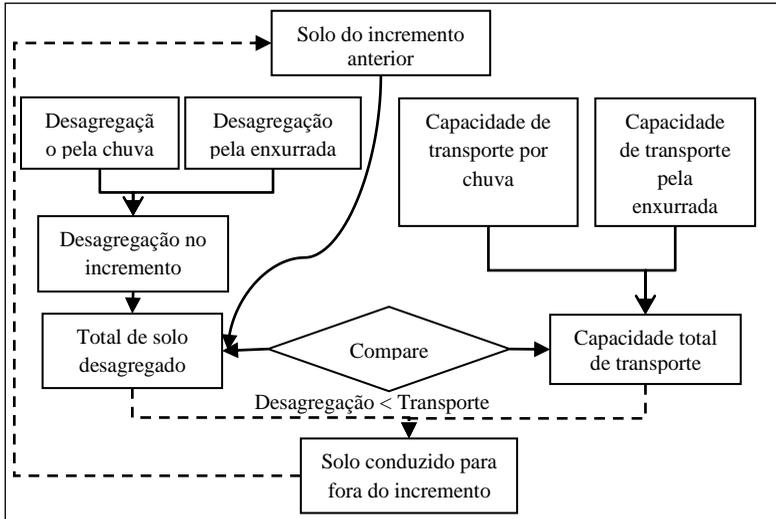
Segundo Stocking (1982), a USLE é um excelente previsor para perdas de solo, desde que haja disponibilidade de dados de experimentos locais para derivar os valores dos fatores da equação e que as previsões feitas através dela sejam somente dentro da ordem de valores usadas para derivar a equação.

A USLE sofreu, com o passar dos anos, algumas alterações. Na década de 1990 foi então substituída pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE). A RUSLE mantém os seis fatores da USLE, no entanto, apresenta um algoritmo computacional para calcular ou estimar estes fatores. As outras mudanças estão relacionadas à inclusão de condições não consideradas no *Agriculture Handbook Number 537* (WISCHMEIER et al., 1978).

### 2.3.2 Modelos fundamentais ou mecanísticos

A importância dos princípios fundamentais no processo de erosão foi reconhecido a muito tempo. Ellison (1947) apresentou uma extensa análise sobre os diversos subprocessos relacionados à erosão hídrica e sugeriu que cada um deles fosse estudado e representado individualmente. Seguindo as ideias de Ellison (1947), Meyer et al. (1969) propuseram um modelo matemático (Fonte: ) para descrever o processo de erosão hídrica. Quatro subprocessos foram avaliados: desagregação pelo impacto das gotas, desagregação pela enxurrada, transporte pelas gotas (salpico) e transporte pela enxurrada. A quantidade de sedimentos produzida era então comparada à capacidade de transporte para verificar se haveria sedimentação ou perdas de solo por erosão.

Figura 1 – Modelo do processo de erosão hídrica.



Fonte: (MEYER et al., 1969)

A maioria dos modelos, implícita ou explicitamente, baseia-se na equação do balanço de massa. Conforme Kirkby (1980), para um declive lateralmente uniforme, tem-se:

$$A = \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} \quad (2)$$

onde  $S$  é a taxa de transporte de sedimentos (média transversal ao sentido do declive),  $x$  é a distância horizontal a partir do início do segmento,  $z$  é a elevação da superfície do solo (média transversal ao sentido do declive),  $t$  é o tempo e  $A$  é a taxa de adição de sedimentos (média transversal ao sentido do declive).

No entanto, devido à importância dos processos hidrológicos sobre erosão, um modelo para previsão de erosão também deve levar em conta o comportamento dos diferentes componentes do ciclo hidrológico.

### **2.3.3 Sub modelos de erosão**

Trabalhos sobre modelagem de erosão tem-se concentrado em três aspectos principais, que podem ocorrer de forma simultânea ou não: 1) desagregação e transporte pelas gotas da chuva; 2) transporte e desagregação pela enxurrada, e; 3) a interação entre capacidade de desagregação e de transporte das partículas de solo.

Segundo Ellison (1947) nas regiões entre sulcos, a desagregação de partículas da massa do solo é, conceitualmente, realizada exclusivamente pelo impacto das gotas de chuva, e o transporte das partículas desagregadas é realizado, quase que exclusivamente, pelo fluxo laminar. A erosão em sulcos, por sua vez, ocorre pela concentração do escoamento superficial na superfície do solo, provocada pelas irregularidades no terreno, naturais ou não, e por diferentes características relacionadas à erodibilidade do solo. Conforme Foster (1982), a magnitude destes processos fundamentais é dependente de sua ocorrência em sulcos ou na região entre sulcos. No entanto, Rose et al. (1983) salientam que, para os pequenos comprimentos de declive, como aqueles usados para elaboração dos modelos, a área ocupada pelos sulcos apresenta uma taxa de erosão similar ou levemente superior aquela entre os sulcos, não havendo, portanto, necessidade de individualização.

#### **2.3.3.1 Desagregação e transporte pelas gotas da chuva**

Um modelo de desagregação de partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva deve levar em consideração o tamanho e a massa das gotas, a velocidade terminal de impacto e a profundidade da lâmina de água (FOSTER, 1982).

Os solos diferem em sua suscetibilidade à desagregação pelo impacto das gotas em função de suas características físicas, químicas e mineralógicas (WISCHMEIER et al., 1969).

A taxa de desagregação de partículas pelo impacto da gota é dependente do tempo. Moldenhauer et al. (1968), verificaram que, em alguns casos, a taxa de desagregação aumenta rapidamente a partir do início da chuva, alcança um pico e então decai exponencialmente.

Mutchler et al. (1975) sugeriram que uma altura de 6 mm ou mais de lâmina de água elimina a desagregação pelo impacto das gotas de chuva e que a modelagem de desagregação deve ser procedida, utilizando forças de cisalhamento na superfície do solo

provocado pelo impacto das gotas. Foster (1982) salienta que este efeito é verificado, principalmente, no caso de superfícies planas e considera ideal um modelo baseado nas forças a partir de uma única gota e na distribuição de probabilidade das gotas em uma chuva, para descrever fisicamente a erosividade da chuva.

A capacidade da chuva para transportar partículas de solo por salpico é uma função do grau de declive, quantidade de chuva, transportabilidade do solo, microtopografia e velocidade do vento (MEYER et al., 1969).

Ekern (1951), observou que a quantidade de solo transportado pelo salpico das gotas é proporcional ao grau de declive, o que é corroborado pelas observações de David et al. (1975). Para uma superfície plana o transporte de partículas por salpico é praticamente zero.

Embora Meyer et al. (1969) tenham derivado uma equação para estimar o transporte de partículas de solo pelo salpico das gotas a maioria dos trabalhos sobre modelagem desconsidera-o pela sua pequena contribuição para o processo global de transporte de sedimentos (GILLEY et al., 1985; DAVID et al., 1975; BEASLEY, 1980).

### **2.3.3.2 Transporte e desagregação pelo fluxo superficial**

A maioria dos trabalhos sobre modelagem considera a força tratora ou força de cisalhamento como forma de representar a capacidade de desagregação do fluxo superficial. Kilinc & Richardson (1973) e David & Beer (1975) propuseram uma aproximação para a força de cisalhamento média sobre uma superfície que é dependente do peso específico da água, da declividade e da altura da lâmina de escoamento. Quando o fluxo ocorre sobre uma superfície uniformemente lisa, a força de cisalhamento, usualmente é muito pequena quando comparada com a resistência ao cisalhamento de solos coesivos. Sob tais condições, somente uma pequena quantidade de solo será desagregada pelo fluxo superficial, podendo ser desconsiderada.

Meyer & Wischmeier (1969) considerando que a força de cisalhamento é proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo e com base nas relações apresentadas por Meyer (1965) sobre a velocidade do fluxo superficial, grau de declividade, vazão e rugosidade hidráulica, desenvolveram uma relação para a taxa de

desagregação pelo fluxo superficial. Mais tarde, Beasley et al. (1980) incluíram nestas relações os fatores  $C$  (práticas de cultivo) e  $K$  (erodibilidade do solo) da USLE. Para Beasley et al. (1980) o fluxo superficial sob condições de campo, tende a se concentrar ao longo de pequenos sulcos, onde a desagregação pode ser bastante significativa.

Diversos estudos sobre erosão em solos coesivos têm procurado relacionar a força de cisalhamento média sobre uma superfície a uma tensão crítica de cisalhamento, a qual seria a força necessária para iniciar o movimento das partículas do solo. Partheniades (1965) verificou que a taxa de erosão foi estritamente dependente da força de cisalhamento acima de um certo valor crítico. Foster et al. (1977), sugerem que a taxa de desagregação nos sulcos, pode ser assumida como sendo proporcional a diferença entre a força de cisalhamento efetiva sobre a superfície e a força de cisalhamento crítica.

De acordo com Meyer & Wischmeier (1969), a capacidade do fluxo superficial é aproximadamente proporcional à quinta potência da velocidade do fluxo, ou seja,  $V^5$ . Levando isso em consideração desenvolveram uma relação para a capacidade de transporte do fluxo superficial que é dependente da declividade do solo, da taxa de escoamento superficial e de um coeficiente que está relacionado à influência da distribuição do tamanho e densidade das partículas do sedimento sobre a transportabilidade pelo fluxo.

David & Beer (1975) também propuseram uma relação para a capacidade de transporte do fluxo superficial que é dependente da altura da lâmina de escoamento, da declividade da superfície e de fatores relacionados às propriedades do solo. No entanto, sob condições normais de campo, sua relação aplica-se somente a áreas com ausência de sulcos, onde a capacidade de transporte limita a produção de sedimentos, uma vez que, utiliza parâmetros médios, característicos da área inter sulcos, a qual representa a maior fração da área da bacia.

Gilley et al. (1985) por sua vez sugerem que a capacidade de transporte nos sulcos pode ser determinada por uma relação que depende de fatores de transporte de sedimentos, do peso específico da água, da altura da lâmina de escoamento, da velocidade de escoamento e da declividade.

Na realidade, não existe uma equação de transporte de sedimentos que se aplique a todas as situações. De acordo com Foster (1982) cada pesquisador tem certa inclinação por uma ou outra equação. Alonso et al. (1981) testando várias equações de transporte

de sedimentos, sugerem que a equação deve ser escolhida em função da situação, precisão exigida e facilidade de coleta de parâmetros exigidos.

### **3 HIPÓTESES**

- 1) O modelo simplificado de Hartley (1987) pode representar as perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial em diferentes solos.
- 2) O modelo de Hartley (1987) pode representar as perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo e cultivo.
- 3) O modelo de Hartley (1987) pode prever, com melhor precisão, as perdas de água do que as perdas de solo.

### **4 OBJETIVOS**

#### **4.1 OBJETIVO GERAL**

Proceder à análise do modelo simplificado sugerido por Hartley (1987), além de construir e adequar novas rotinas a serem incorporadas no modelo original e validá-las em algumas situações reais.

#### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Analisar o comportamento do modelo simplificado sugerido por Hartley (1987) em situações reais;
- 2) Propor novas rotinas que serão incorporadas ao modelo original;
- 3) Testar e validar o modelo com as novas rotinas em situações reais.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 ORIGEM DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados primários deste trabalho consistiram de perdas de solo e água por erosão, causadas por chuva simulada, oriundos da base de dados do Professor Indegardis Bertol, do Departamento de Solos do CAV/UEDESC, SC.

Os experimentos que originaram os dados primários foram conduzidos de acordo com as condições descritas por Wischmeier et al. (1978), seguindo metodologias de coleta e processamento de amostras de água e sedimentos, descritas por Cogo (1978a; 1978b). Os dados foram coletados em experimentos conduzidos em duas áreas experimentais, uma em Lages e, outra, em São José do Cerrito, SC.

#### 5.1.1 Área experimental I

Área experimental I está localizada no Colégio Agrícola Caetano Costa (MELLO, 2002), no município de São José do Cerrito, Estado de Santa Catarina, situada a 28°55'44" de latitude Sul e 51°08'32" de longitude oeste, na região do Planalto Sul Catarinense, com clima do tipo Cfb, de Köppen, subtropical úmido, e altitude média de 846 m. A região onde se situa esta área caracteriza-se por apresentar relevo variável, suave, ondulado e forte ondulado, predominando as duas últimas formas, com extensos bosques de capoeira e de mata secundária, intercalados por araucárias (*Araucaria angustifolia*) e por pequenas áreas de pastagem natural.

A profundidade dos horizontes e a composição granulométrica do solo da área experimental, conforme Mello (2002), são apresentadas na Tabela 1.

Com os dados obtidos do perfil, Mello (2002) classificou o solo como um Nitossolo Háplico Alumínico, antiga Terra Roxa Estruturada (EMBRAPA, 2006), que corresponde à classe Typic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 1999). Em condições naturais, o teor de carbono orgânico do solo é de 10,6 g kg<sup>-1</sup> no horizonte A e de 4,1 g kg<sup>-1</sup> no horizonte B (BERTOL et al., 2003).

Tabela 1 – Profundidade dos horizontes e composição granulométrica do solo da área experimental I.

Horizonte	Espessura	Argila	Areia	Silte
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
A1	0 – 16	627	118	255
A2	16 – 32	733	102	165
AB	32 – 50	680	105	215
BA	50 – 68	706	113	181
B	68 – 115 <sup>+</sup>	592	115	293

Fonte: (MELLO, 2002)

A área experimental I, conforme Engel (2005), era utilizada com campo natural melhorado, até março de 2000. O melhoramento consistiu na introdução de azevém (*Lolium multiflorum*) e trevo vermelho (*Trifolium pratense*), além da aplicação de 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico em cobertura, quando foi sistematizada para instalação dos tratamentos de preparo e cultivo do solo com soja, visando avaliar perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico sob condições de chuva simulada (MELLO, 2002). Na mesma ocasião, parte da área foi preparada com duas arações e três gradagens, na qual foram instalados os tratamentos de solo sem cultivo, cultivo mínimo e preparo convencional. Nos dois últimos tratamentos, realizou-se a correção da acidez e da fertilidade do solo, com a incorporação de 11 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 300 kg ha<sup>-1</sup> de adubo da fórmula 5-30-15 (COMISSÃO, 1995). O restante da área, no qual foram instalados os tratamentos de semeadura direta sobre resíduos dessecados e semeadura direta sob resíduos queimados, não sofreu nenhum preparo do solo, tendo apenas, sido aplicada, em superfície, na mesma ocasião, metade da dose de calcário recomendada.

Em 2001 semeou-se ervilhaca (*Vicia sativa*) em toda a área, com exceção daquela onde estavam localizados os tratamentos de solo sem cultivo e de campo nativo melhorado. Em outubro do mesmo ano, durante a floração desta cultura, a mesma foi dessecada quimicamente. Sobre os resíduos culturais de ervilhaca, em novembro de 2001, foi semeado milho (*Zea mays*). Em junho de 2002, foi semeada aveia preta (*Avena strigosa*) antes da colheita do milho, nos tratamentos de semeadura direta e preparo convencional (o tratamento semeadura direta foi instalado nas mesmas parcelas onde havia o

tratamento cultivo mínimo). Em novembro do mesmo ano, a aveia preta foi dessecada e, então, semeado o feijão (*Phaseolus vulgaris*).

### 5.1.2 Área experimental II

Área experimental II está descrita em Luciano (2008). Localizada no Centro de Ciências Agroveterinárias - CAV, Lages, SC, 27°46'57'' de latitude Sul e 50°18'20'' longitude oeste, na região do planalto Sul Catarinense, com clima do tipo Cfb de Köppen (mesotérmico), com altitude média de 900 m. Caracteriza-se por apresentar relevo suave-ondulado, com pendentes variando de 200 a 300 m de comprimento, com áreas de pequenas lavouras experimentais, pastagens cultivadas e pastagem natural.

A profundidade dos horizontes e a composição granulométrica do solo da área experimental, conforme Barbosa (2009b), são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Profundidade dos horizontes e composição granulométrica do solo da área experimental II.

Horizonte	Espessura	Argila	Areia	Silte
	cm	-----	%	-----
A	0 – 17	27	24	49
AB	17 – 35	29	26	45
Bi	35 – 58/60	29	25	46
Cr	58/60 – 85+	32	06	62
Média		29	20	51

Fonte: (BARBOSA, 2009b)

O solo foi classificado como um Cambissolo Húmico Alumínico léptico (EMBRAPA, 2006), Inceptisol (SOIL SURVEY STAFF, 1999), o qual representa aproximadamente 69% dos solos do município de Lages (BENEZ, 2002).

A área experimental, conforme Barbosa (2009a), era mantida como campo natural até março de 2006. A partir daí, o solo foi preparado com uma aração e três gradagens. Em seguida, realizou-se a correção da acidez e da fertilidade do solo com a incorporação de 15 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (PRNT = 80%). A incorporação do calcário foi realizada após a aração, aplicando-se meia dose do calcário ao solo, gradeando-se, aplicando-se o restante da dose e, em seguida, gradeando-se novamente. Antes da semeadura das culturas os

fertilizantes (superfosfato simples, cloreto de potássio e uréia) foram distribuídos manualmente e incorporados ao solo com a última gradagem.

## 5.2 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental apresenta área útil de 38,5 m<sup>2</sup>, com dimensão de 3,5 m de largura por 11 m de comprimento no sentido paralelo ao declive. Cada parcela é limitada na extremidade superior e nas laterais por chapas galvanizadas com 20 cm de altura e cravadas 10 cm no solo. A extremidade inferior é delimitada por uma calha coletora da enxurrada que, conectada a um tubo de PVC, conduz o escoamento até o local de coleta, seis metros abaixo.

## 5.3 APARELHO SIMULADOR DE CHUVAS

Os experimentos foram conduzidos em condições de chuva simulada, com a utilização de um aparelho simulador de chuvas de braços rotativos que cobre simultaneamente duas parcelas, distanciadas entre si em 3,5 m (EMBRAPA, 1975).

O simulador de chuvas contém 30 bicos, distribuídos de forma helicoidal em 10 braços com comprimento de 7,5 m, formando uma espiral concêntrica. Durante a condução dos experimentos, o simulador operou com apenas 15 bicos abertos para gerar a intensidade planejada, que foi controlada por meio de dois manômetros.

## 5.4 EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NA ÁREA EXPERIMENTAL I

### 5.4.1 Experimento 1

O experimento 1, conforme descrito em Engel (2005), realizado em condições de chuva simulada, foi desenvolvido entre outubro de 2003 e abril de 2004. Foram utilizadas dez parcelas experimentais, compreendendo cinco tratamentos com duas repetições, as quais apresentavam declividade média de 0,16 m m<sup>-1</sup> com amplitude de variação da declividade de 0,12 a 0,22 m m<sup>-1</sup> (ANEXO A).

Os tratamentos estudados consistiram de sistemas de preparo do solo sob o cultivo de soja, além de um tratamento sem cultivo do solo.

O nabo forrageiro foi cultivado antes da soja em todos os tratamentos, com exceção do solo sem cultivo, no período entre abril e outubro de 2003, para propiciar cobertura ao solo, produziu 4 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca de parte aérea. Em outubro de 2003, sobre os resíduos de nabo forrageiro, foram implantados os tratamentos, distribuídos totalmente ao acaso, assim descritos:

Tratamento 1 – preparo do solo com uma aração seguida de duas gradagens, sem cultivo do solo e livre de vegetação - SC.

Tratamento 2 – preparo convencional do solo com uma aração seguida de duas gradagens, sobre o resíduo de nabo forrageiro, com semeadura de soja – PC.

Tratamento 3 – semeadura direta de soja sobre o resíduo de nabo forrageiro queimado, no qual não houve preparo do solo por ocasião da instalação do experimento - SQ.

Tratamento 4 – semeadura direta de soja sobre o resíduo de nabo forrageiro dessecado quimicamente, no qual não houve preparo do solo por ocasião da instalação do experimento - SD.

Tratamento 5 – semeadura direta de soja sobre o resíduo de nabo forrageiro dessecado quimicamente, no qual houve preparo do solo na instalação do experimento, em março de 2000 e, por isso, é aqui denominado de semeadura direta tradicional - ST.

Antes da realização de cada teste de chuva simulada, destinada a produzir enxurrada para a coleta de dados, foi aplicada, em cada tratamento, uma chuva denominada de chuva de umedecimento do solo, com intensidade constante de 64 mm h<sup>-1</sup> e com duração suficiente para fazer com que se iniciasse a enxurrada. A finalidade dessa chuva era umedecer o solo, visando uniformizar a umidade nos distintos tratamentos. No dia seguinte (aproximadamente 24 horas após) à aplicação da chuva de umedecimento do solo, foram aplicados os testes de chuva simulada. O primeiro teste foi aplicado imediatamente após a semeadura da soja e, os demais, em intervalos regulares de 30 dias, totalizando cinco testes. Essas chuvas tinham intensidade planejada de 64 mm h<sup>-1</sup> e duração de uma hora.

### 5.4.2 Experimento 2

O experimento 2, conforme descrito em Leite (2003), realizado em condições de chuva simulada, foi desenvolvido entre março de 2001 e abril de 2003. Foram utilizadas doze parcelas, compreendendo seis tratamentos com duas repetições, com declividade média de  $0,165 \text{ m m}^{-1}$  e amplitude de variação da declividade de  $0,12$  a  $0,22 \text{ m m}^{-1}$  (ANEXO M).

Os tratamentos estudados consistiram de sistemas de manejo do solo cultivados com milho e feijão, além de um tratamento de solo sem cultivo (parcela padrão da USLE) e outro de campo natural melhorado.

A ervilhaca foi cultivada para cobertura do solo antes do milho e produziu  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  de matéria seca e, a aveia, cultivada para cobertura do solo imediatamente após a colheita do milho e antes do cultivo do feijão, produziu  $5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de matéria seca. Em março de 2001, foram implantados os tratamentos de manejo do solo, distribuídos totalmente ao acaso, em duas repetições:

Tratamento 1 – solo preparado com uma aração e duas gradagens, duas vezes ao ano, no sentido paralelo ao declive, sem cultivo – SSC (parcela padrão da USLE), na mesma época de preparo do solo e semeadura das culturas nos demais tratamentos.

Tratamento 2 – solo preparado para a incorporação de corretivos de acidez e fertilidade, no momento da implantação do experimento, março de 2000. Desde então, o solo não recebeu preparo algum - SDI, tendo sido cultivado com milho e feijão na primavera/verão e com ervilhaca comum e aveia preta no outono/inverno, em 2001/2002 e 2002/2003.

Tratamento 3 – solo preparado com uma aração mais duas gradagens - PCO, duas vezes ao ano, por ocasião da implantação das culturas de milho e feijão na primavera/verão e de ervilhaca comum e aveia preta no outono/inverno, em 2001/2002 e 2002/2003.

Tratamento 4 – o solo não recebeu preparo algum. A semeadura da cultura de primavera/verão no primeiro ano de condução do experimento ocorreu sobre os resíduos de campo nativo dessecados quimicamente e queimados. As semeaduras de milho e de feijão na primavera/verão foram feitas sobre os resíduos de ervilhaca comum e de aveia preta, respectivamente, dessecados quimicamente e queimados – SDDQ.

Tratamento 5 – o solo não recebeu preparo algum. A semeadura das culturas de primavera/verão no primeiro ano de condução do experimento ocorreu sobre os resíduos de campo nativo dessecado quimicamente. As semeaduras diretas de milho e de feijão na primavera/verão foram feitas sobre os resíduos de ervilhaca comum e de aveia preta, respectivamente, dessecados quimicamente – SDD.

Tratamento 6 – o solo permaneceu sem preparo e cultivo algum, com a cobertura composta pelo campo nativo melhorado – CNM, como testemunha.

Sobre os tratamentos foram aplicados três testes de chuva simulada em cada um dos cultivos de milho e feijão, sendo o primeiro aplicado imediatamente após a semeadura das culturas e, os demais, em intervalos regulares de 45 dias no cultivo do milho e de 30 dias no cultivo do feijão, com intensidades constantes planejadas de  $64 \text{ mm h}^{-1}$  e durações variáveis, suficientes para a enxurrada atingir taxa constante, tendo sido efetuadas seis chuvas por teste num mesmo dia. Ao todo, foram realizadas, portanto, 36 chuvas simuladas durante os cultivos de milho e feijão.

### 5.4.3 Experimento 3

O experimento 3, conforme descrito em Barbosa (2011), realizado em condições de chuva simulada, foi desenvolvido entre maio de 2009 e maio de 2011. Como o experimento foi realizado em área próxima aos experimentos 1 e 2, com o solo apresentando características semelhantes, com pequenas diferenças, ele será aqui descrito.

A área experimental localizada no Centro de Educação Profissionalizante – CEDUP, do Colégio Agrícola Caetano Costa, em São José do Cerrito, SC, na região do Planalto Sul Catarinense, a  $27^{\circ}43'$  latitude Sul e  $50^{\circ}31'$  longitude oeste, com altitude de 800 m. O clima é do tipo Cfb de Köppen (subtropical úmido, chuvoso e com verões frescos). Apresenta relevo ondulado a fortemente ondulado.

O solo é um Nitossolo Bruno Aluminoférrico húmico (EMBRAPA, 2006), de classe textural muito argiloso, com composição granulométrica média da camada superficial de 0-0,05 m de solo é de 62% de argila, 10% de silte e 28% de areia, com teor de carbono orgânico de  $25 \text{ g kg}^{-1}$ .

A área experimental, conforme Barbosa (2011), encontrava-se sob uso agrícola, sendo cultivada há cinco anos em semeadura direta

e, anteriormente a esse período, foi cultivada sob preparo convencional do solo. As culturas utilizadas no local, antecedente ao experimento, foram o feijão, o milho e a soja, durante o verão, e a aveia, a ervilhaca e o pousio com predomínio de azevém, durante o inverno. Em maio de 2009, no início do experimento, foi semeada aveia em consórcio com ervilhaca sobre os resíduos culturais de feijão. Com isso, na época de realização do primeiro teste de chuva (experimento A), sobre os resíduos culturais do milho, a área estava há seis anos sendo cultivada sob semeadura direta.

Foram testadas duas direções de semeadura e duas doses de resíduo cultural, em duas repetições, totalizando oito unidades experimentais. O estudo foi dividido em três experimentos, denominados A, B e C, sendo cada um deles realizado em épocas diferentes e composto por um tipo específico de resíduo cultural. No primeiro experimento foi testado o resíduo de milho, no segundo, o resíduo de trigo e, no terceiro, o resíduo de soja.

A declividade média das parcelas era de  $0,144 \text{ m m}^{-1}$ , com variação de  $0,135$  a  $0,151 \text{ m m}^{-1}$  (ANEXO N).

Em todos os experimentos, após o manejo do resíduo e antes do teste de chuva, foi realizada operação de semeadura mecanizada, sem o uso de sementes e adubos, com o propósito de deixar as marcas de preparo nas direções em contorno e na pendente, respeitando os tratamentos.

#### **5.4.3.1 Experimento A: Teste de chuva realizado sobre o resíduo cultural de milho (*Zea mays*)**

Em outubro de 2009, sobre os resíduos do consórcio de aveia e ervilhaca, foi realizada a semeadura mecanizada de milho. No dia 23 de junho de 2010 foi realizado o corte dos colmos, deixando-se apenas as soqueiras da cultura, em altura de aproximadamente  $0,07 \text{ m}$  da superfície do solo, sendo o restante removido das unidades experimentais. Fora das parcelas, as plantas foram picadas em peças de  $0,1$  a  $0,15 \text{ m}$  de comprimento, para simular o processo de colheita realizado com colhedora. Para o retorno do resíduo nas unidades experimentais, o resíduo foi pesado e redistribuído, com o propósito de uniformização de sua quantidade nas parcelas, de acordo com a dose definida para cada uma delas. A produção de matéria seca do resíduo cultural de milho foi de  $9,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de milho:

- a) Semeadura direta na direção transversal ao declive com todo o resíduo ( $9,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**C-M<sub>1/1</sub>**);
- b) Semeadura direta na direção transversal ao declive com metade do resíduo ( $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**C-M<sub>1/2</sub>**);
- c) Semeadura direta na direção paralela ao declive com todo o resíduo ( $9,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**P-M<sub>1/1</sub>**);
- d) Semeadura direta na direção paralela ao declive com metade do resíduo ( $4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**P-M<sub>1/2</sub>**).

#### **5.4.3.2 Experimento B. Teste de chuva realizado sobre o resíduo cultural do trigo (*Triticum aestivum*)**

Após o teste de chuva sobre o resíduo de milho (28-29/06/2010) foi realizada a correção dos sulcos formados nas unidades experimentais devido ao escoamento superficial da água, com o uso de enxada manual. No dia 29 de julho de 2010, foi realizada a semeadura do trigo. No dia 22 de novembro de 2010, na fase final do florescimento e início de enchimento de grãos do trigo, realizou-se uma roçada, com roçadora costal, sendo o corte efetuado em duas etapas, ou duas alturas de corte, com o propósito de formar peças pequenas de resíduos, simulando uma colhedeira. Foi deixada a soqueira da cultura em altura de aproximadamente 0,07 m da superfície do solo, e o restante do resíduo foi removido da superfície. O resíduo foi pesado e redistribuído, conforme o tratamento (total e metade da dose). A produção de matéria seca do resíduo de trigo foi de  $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de trigo:

- a) Semeadura direta na direção transversal ao declive com todo o resíduo ( $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**C-T<sub>1/1</sub>**);
- b) Semeadura direta na direção transversal ao declive com metade do resíduo ( $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**C-T<sub>1/2</sub>**);
- c) Semeadura direta na direção paralela ao declive com todo o resíduo ( $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**P-T<sub>1/1</sub>**);
- d) Semeadura direta na direção paralela ao declive com metade do resíduo ( $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**P-T<sub>1/2</sub>**).

### 5.4.3.3 Experimento C. Teste de chuva realizado sobre o resíduo cultural da soja (*Glycine max*)

Após o teste de chuva sobre o resíduo de trigo (02-03/12/2010) foi realizada, manualmente com auxílio de enxada, a correção de sulcos formados nas unidades experimentais e, após, foi realizada a semeadura da soja (10/12/2010).

Ao final do ciclo de desenvolvimento da cultura foi feita a colheita manual da soja com auxílio de foices, deixando apenas as soqueiras da cultura. As plantas foram trilhadas para separação dos grãos e o resíduo foi pesado e redistribuído sobre a superfície do solo nas parcelas conforme o tratamento (total e metade da dose). A produção de matéria seca do resíduo de soja foi de 3,6 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de soja:

- a) Semeadura direta na direção transversal ao declive com todo o resíduo (3,6 Mg ha<sup>-1</sup>) de soja produzido (C-S<sub>1/1</sub>);
- b) Semeadura direta na direção transversal ao declive com metade do resíduo (1,8 Mg ha<sup>-1</sup>) de soja produzido (C-S<sub>1/2</sub>);
- c) Semeadura direta na direção paralela ao declive com todo o resíduo (3,6 Mg ha<sup>-1</sup>) de soja produzido (P-S<sub>1/1</sub>);
- d) Semeadura direta na direção paralela ao declive com metade do resíduo (1,8 Mg ha<sup>-1</sup>) de soja produzido (P-S<sub>1/2</sub>).

### 5.4.3.4 Realização dos testes de chuva simulada

Sobre os tratamentos foi aplicada chuva simulada com duração de 1,5 h e intensidade constante planejada de 65 mm h<sup>-1</sup>. A chuva de 1,5 h tinha como propósito obter a taxa constante de enxurrada, para com isso ser possível simular comprimentos de declive maiores que o segmento de 11 m das unidades experimentais, por meio da adição de fluxos extras de água limpa na cabeceira das parcelas. Os dados de fluxo extras não foram utilizados para fins de simulação no modelo proposto.

No experimento A, realizado sobre o resíduo cultural do milho, o teste de chuva simulada ocorreu nos dias 28 e 29 de junho de 2010. No experimento B, sobre o resíduo do trigo, o teste ocorreu nos dias 02 e 03 de dezembro do mesmo ano e, no experimento C, sobre o resíduo de soja, o teste ocorreu nos dias 06 e 07 de maio de 2011.

## 5.5 EXPERIMENTOS CONDUZIDOS NA ÁREA EXPERIMENTAL II

### 5.5.1 Experimento 4

O experimento 4, conforme descrito em Marioti (2012), foi realizado em condições de chuva simulada entre 2010 e 2011. Foram instaladas oito parcelas no sistema de semeadura direta de soja e milho, semeados no sentido do declive e em contorno ao declive.

A área experimental era mantida com campo natural até 2006, quando foi alterada para a implantação de experimentos de erosão sob chuva simulada. Foram realizadas operações de aração e gradagem e o solo foi corrigido para acidez e fósforo com aplicação de calcário dolomítico e superfosfato triplo. No cultivo de primavera-verão de 2009-2010, cultivou-se milho solteiro, feijão solteiro, soja solteira e consórcio de milho e feijão, enquanto, no cultivo de outono/inverno de 2010, o cultivo foi de trigo.

Os tratamentos foram distribuídos em dois blocos ao acaso. Em cada bloco, foram distribuídos quatro tratamentos com cultivo do solo sob semeadura direta, sobre resíduo de trigo.

Tratamento 1: cultivo de soja com direção de semeadura no sentido do declive;

Tratamento 2: cultivo de soja com direção de semeadura transversal ao declive;

Tratamento 3: cultivo de milho com direção de semeadura no sentido do declive;

Tratamento 4: cultivo de milho com direção de semeadura transversal ao declive.

O experimento teve início em dezembro de 2010 após a colheita do trigo cultivado nas parcelas antes da instalação dos tratamentos. As espigas do trigo foram colhidas manualmente e a palha restante foi picada e redistribuída uniformemente sobre as parcelas nas quais a soja e o milho seriam semeados sob semeadura direta, mantendo-se 100 % dos resíduos sobre o solo.

Sobre os tratamentos foram aplicadas chuvas simuladas com duração de 90 min. e intensidade constante e planejada de  $65 \text{ mm h}^{-1}$ . A intensidade das chuvas foi controlada por meio de um manômetro, com ajuste manual da pressão, necessária para se conseguir a intensidade de chuva planejada.

O primeiro teste foi realizado 30 dias após a semeadura das culturas e, os demais, espaçados em 30 dias.

### 5.5.2 Experimento 5

O experimento 5, conforme descrito em Bertol et al. (2013), realizado em condições de chuva simulada, foi desenvolvido no campo entre 2009 e 2010. Inicialmente, o solo estava coberto por pastagem nativa e, em abril de 2006, foi lavrado com uma aração e três gradagens. A acidez do solo foi corrigida através da aplicação de 15 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário, incorporado ao solo por uma aração e duas gradagens. Entre maio e novembro de 2006, a aveia preta (*Avena strigosa*) e ervilhaca comum (*Vicia sativa*) foram cultivadas, utilizando sistema de semeadura direta para receber cinco testes de chuva simulada, entre setembro e dezembro de 2006 (LUCIANO, 2008). A sequência de culturas, em semeadura direta, foi de feijão, colhido em abril de 2007; ervilhaca sendo dessecada quimicamente em novembro de 2007, seguido pelo cultivo de feijão, até abril de 2008. Após a colheita do feijão, o solo foi lavrado com uma aração e duas gradagens e a área foi semeada novamente com ervilhaca, com as sementes sendo incorporadas por uma leve gradagem. A próxima sequência de culturas sob sistema de semeadura direta foi ervilhaca e feijão colhidos em abril de 2009 e uma mistura de ervilhaca e aveia, semeada com sementes incorporadas com uma gradagem leve em outubro de 2009. Em 1º de dezembro de 2009 as parcelas experimentais foram estabelecidas no solo não lavrado.

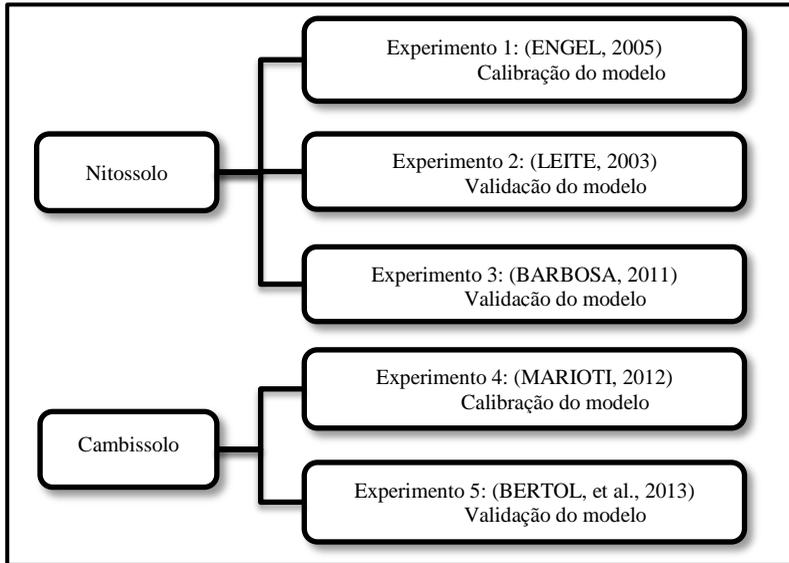
A área, sem preparo prévio do solo, foi cultivada em contorno entre 2009 e 2010, com os seguintes tratamentos: milho solteiro, soja solteira, feijão solteiro e milho e feijão consorciados. Os tratamentos foram instalados com duas repetições, totalizando oito unidades experimentais distribuídas em dois blocos.

Os tratamentos foram submetidos a quatro testes de chuva simulada com intensidade constante de 64 mm h<sup>-1</sup> e duração de 1,0 h. O primeiro teste foi aplicado 18 dias após a semeadura das culturas e, os demais, 39, 75 e 120 dias após o primeiro.

## 5.6 RESUMO DOS EXPERIMENTOS

Um resumo dos experimentos pode ser visualizado na Figura 2, onde é possível identificar quais dos experimentos foram utilizados para a calibração do modelo e quais foram utilizados para a sua validação.

Figura 2 – Fluxograma indicando os experimentos que foram utilizados para a calibração e validação do modelo



Fonte: Próprio autor

## 5.7 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida no departamento de solos do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV na Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, entre 2010 e 2013. Ela consistiu nas seguintes etapas: a) estudo e compreensão do modelo simplificado sugerido por Hartley (1987); b) análise e calibração do modelo simplificado com dados obtidos em algumas situações reais, c) proposição, construção e validação de novas rotinas a serem incorporadas ao modelo original.

No item 5.8 será apresentado o modelo proposto por Hartley (1987), já incluindo algumas propostas de alterações/inclusões feitas nesta pesquisa.

## 5.8 MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO

### 5.8.1 Base conceitual

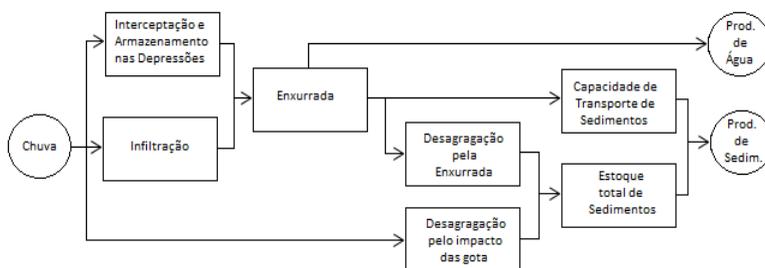
O modelo leva em consideração características físicas do solo, vegetação e precipitação para determinar a produção de água e sedimentos por erosão hídrica, bem como a quantidade de solo perdida por erosão. Na forma original o modelo prevê erosão laminar e em sulcos para uma superfície sujeita a uma chuva de intensidade constante.

Na determinação da produção de água e sedimentos por erosão hídrica o modelo considera: interceptação da chuva pela cobertura do solo, infiltração de água no solo, armazenamento da água nas microdepressões do solo, desagregação do solo pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial e processos de transporte de sedimentos.

Na determinação da capacidade de transporte de sedimentos, o modelo considera apenas a contribuição do escoamento superficial, tendo em vista a baixa capacidade de transporte pelo salpico das gotas de chuva.

Uma representação esquemática do modelo pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática do modelo simplificado



Fonte: (HARTLEY, 1987)

### 5.8.2 Determinação da quantidade de escoamento superficial

A altura da lâmina de escoamento superficial ( $r$ ) é determinada a partir da equação de continuidade:

$$r = it_{ch} - I - Z - F \quad (3)$$

onde  $i$  é a intensidade da chuva (mm/h),  $t_{ch}$  o tempo de duração da chuva (h),  $I$  a lâmina de interceptação (mm),  $Z$  a altura da lâmina de armazenamento nas microdepressões (mm) e  $F$  a lâmina total infiltrada (mm).

#### Lâmina de interceptação

A interceptação está relacionada à cobertura do solo e a vegetação. No modelo simplificado, a interceptação é determinada como segue:

$$I = (CS + CV)I_{max} \quad (4)$$

onde  $CS$  é a fração cobertura de solo por resíduos culturais (%),  $CV$  a fração cobertura vegetal por plantas (%) e  $I_{max}$  a interceptação à máxima densidade de cobertura. No modelo, embora  $I_{max}$  varie com o tipo de vegetação é assumida como 3,5 mm.

#### Proposta de alteração/inclusão para lâmina de interceptação

A interceptação máxima pela cobertura vegetal, no modelo, pode ser estimada pela equação proposta por Ehlers (1989 apud PRUSKI et al., 2001, p. 302).

$$ICV = 0,932 + 0,499 * IAF + 0,0057 * IAF^2 \quad (5)$$

onde  $ICV$  é a interceptação máxima pela cobertura vegetal (mm) e  $IAF$  o índice de área foliar ( $\text{cm}^2$  de folhas  $\text{cm}^{-2}$  de solo)

#### Lâmina de armazenamento nas microdepressões

No modelo simplificado proposto por Hartley (1987), a lâmina de armazenamento nas microdepressões do solo ( $Z$ ) é determinada a partir dos dados da Tabela 3.

Tabela 3 – Altura da lâmina de armazenamento nas microdepressões do solo,  $Z$ , mm\*.

Condições de Superfície	Conteúdo de argila no solo (%)				
	5	12	20	25	>30
Muito rugosa, aração em contorno	6,0	8,8	12,0	18,5	25,0
Rugosa, torrões ao acaso ou desagregação após aração em contorno	3,0	5,3	8,0	13,0	18,0
Levemente rugosa, gradeada longitudinalmente ao contorno	0,0	2,3	5,0	6,5	8,5
Lisa, cultivada no sentido do declive ou apresentando erosão em sulcos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: (HARTLEY, 1987) Complementada

\* Assumindo que a lâmina efetiva é aproximadamente igual à metade do desvio padrão da altura das elevações de superfície do solo

### Proposta de alteração/inclusão para lâmina de armazenamento

A lâmina de armazenamento nas microdepressões, em mm, no modelo, será calculada usando o método empírico proposto por Onstad (1984 apud KAMPHORST et al., 2000, p. 1751):

$$Z = 1,12RR + 0,31RR^2 - 0,12RRS_0 \quad (6)$$

onde  $RR$  é a rugosidade randômica (cm) e  $S_0$  a declividade da superfície do solo, %

### Lâmina total de água infiltrada no solo

No modelo simplificado a determinação da lâmina total de água infiltrada no solo ( $F$ ) foi elaborada usando-se o modelo de infiltração descrito por Smith & Parlange (1978 apud HARTLEY, 1987, p. 711), é estimada usando-se a equação:

$$F = \bar{f} \cdot t_{inf} \quad (7)$$

onde  $F$  é a lâmina total de água infiltrada no solo (mm),  $\bar{f}$  é a taxa de infiltração média, medida a partir do momento em que a chuva atinge a superfície do solo (mm/h) e  $t_{inf}$  o tempo de infiltração (h).

É assumido que o tempo de infiltração ( $t_{inf}$ ) estende-se do momento em que a demanda por interceptação foi exaurida até que a chuva cesse.

O tempo de infiltração é, portanto:

$$t_{inf} = t_{ch} - t_{int} \quad (8)$$

onde  $t_{ch}$  é o tempo total da chuva (h) e  $t_{int}$  o tempo de interceptação (h).

O tempo total de interceptação é dado pela equação:

$$t_{int} = \frac{I}{i} \quad (9)$$

onde  $I$  é a lâmina total interceptada (Equação 4) e  $i$  a intensidade de chuva (mm/h).

A taxa de infiltração média ( $\bar{f}$ ) é estimada usando-se:

$$\bar{f} = f^* \cdot K_s \quad (10)$$

onde  $f^*$  é uma taxa de infiltração média no tempo (adimensional) e  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada.

A taxa de infiltração média no tempo adimensional ( $f^*$ ) pode ser estimada utilizando-se a equação:

$$f^* = \frac{1,55}{\sqrt{t^*}}, \quad f^* < 0,3 \quad (11)$$

no qual  $t^*$  é um tempo adimensional, definido por:

$$t^* = \frac{K_s \cdot t_{inf}}{H \cdot \Delta} \quad (12)$$

onde  $\Delta$  é o déficit de saturação de umidade, o qual é a fração da porosidade do solo não ocupada pela água (adimensional) e  $H$  é a altura de elevação capilar (mm).

O déficit de saturação, teoricamente, pode variar de 0 (zero) para um solo saturado até 1 (um) para um solo completamente seco. No entanto, estes extremos, raramente ocorrem na prática e podem ser aproximados por 0,9 para superfícies secas; 0,4 para superfícies medianamente úmidas e 0,1 para superfícies muito úmidas.

Há uma relação entre  $H$ , pressão capilar, e a distribuição do tamanho de poros, conforme descrito abaixo:

$$H = \frac{P_b \theta (2+3\lambda)}{2(1+3\lambda)} \quad (13)$$

onde  $P_b$  é a pressão capilar crítica, a partir da qual ocorre dessaturação,  $\emptyset$  a porosidade total e  $\lambda$  o índice de distribuição do tamanho de poros.

No entanto, por razão de simplicidade, os valores de  $K_s$  e  $H$  serão determinados a partir da Tabela 4, baseada em Rawls et al. (1982 apud HARTLEY, 1987, p. 711).

Tabela 4 – Valores de parâmetros de infiltração de acordo com a classe textural

Classe Textural	$K_s$ (mm/h)	$H$ (mm)
1 – Areia	210,0	34,0
2 – Franco arenoso	61,1	45,0
3 – Areia franca	25,8	75,0
4 – Franco	13,2	93,0
5 – Franco siltoso	6,8	145,0
6 – Franco argilo arenoso	4,3	136,0
7 – Franco argiloso	2,3	155,0
8 – Franco argilo siltoso	1,5	201,0
9 – Argilo arenoso	1,2	188,0
10 – Argilo siltoso	0,9	225,0
11 – Argiloso	0,6	246,0

Fonte: (HARTLEY, 1987)

### Proposta de alteração/inclusão para lâmina total infiltrada

No modelo, a lâmina total infiltrada,  $F$ , será estimada utilizando-se o modelo de infiltração empírico proposto por Horton conforme descrito em Brandão et al. (2006). Tal modelo descreve a taxa de infiltração instantânea em função do tempo:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\varphi t} \quad (14)$$

Ainda, a infiltração acumulada pode ser expressa pela equação:

$$F = f_c \cdot t + \frac{(f_0 - f_c)}{\varphi} (1 - e^{-\varphi t}) \quad (15)$$

onde  $f$  é a taxa de infiltração no tempo (mm/h),  $f_0$  é a taxa de infiltração inicial (mm/h),  $f_c$  é a taxa de infiltração estável (mm/h),  $\varphi$  é o parâmetro de ajuste da equação que mede o decaimento da taxa de infiltração,  $t$  o tempo de infiltração (h) e  $F$  a infiltração acumulada (mm).

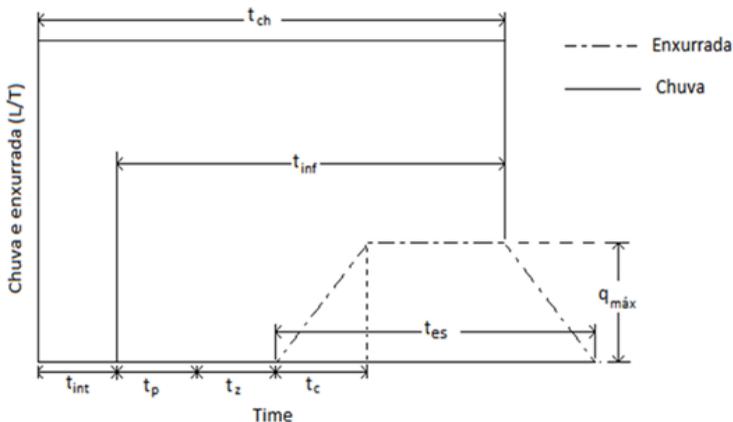
Uma vez estimados os parâmetros  $I$ ,  $Z$  e  $F$ , a quantidade de escoamento superficial é calculada a partir da equação 3.

### 5.8.3 Determinação do hidrograma de escoamento superficial

O hidrograma do escoamento superficial assumido pelo modelo pode ser visualizado na Figura 4. O escoamento inicia após uma série de retardamentos ocasionados pelo tempo de interceptação, o tempo de início de formação da lâmina de superfície (empoçamento) e o tempo de armazenamento nas depressões.

O tempo de empoçamento,  $t_p$ , é obtido fixando a taxa de infiltração média,  $\bar{f}$ , na equação 10, como sendo a intensidade de chuva,  $i$ . A equação é então resolvida para determinar,  $f^*$ . De posse de,  $f^*$ , obtém-se,  $t^*$ , na equação 11. A equação 12 é então resolvida para encontrar,  $t_p$ , que é igual a,  $t_{inf}$ . Este procedimento define o período de tempo sobre os quais a taxa de infiltração média se iguala a taxa de chuva ou a quantidade total de chuva é igual à quantidade total de infiltração.

Figura 4 – Hidrograma admitido no Modelo Simplificado



Fonte: (HARTLEY, 1987)

### Proposta de alteração/inclusão para o tempo de empoçamento

O tempo de empoçamento,  $t_p$ , no modelo será obtido a partir da proposta do Hidrograma admitido no modelo simplificado (HARTLEY, 1987). O tempo de empoçamento,  $t_p$ , será então obtido usando-se:

$$t_p = t_{ies} - t_z - t_{int} \quad (16)$$

onde  $t_{ies}$  é o tempo de início do escoamento (h),  $t_z$  o tempo de armazenamento (h) (Equação 18) e  $t_{int}$  o tempo de interceptação (h).

O tempo de interceptação é aquele determinado pela equação 9, enquanto que o tempo de infiltração é estimado pela equação 8.

A partir da lâmina total infiltrada (Equação 15), a taxa de infiltração média,  $\bar{f}$ , é então determinada usando-se:

$$\bar{f} = \frac{F}{t_{inf}} \quad (17)$$

onde  $t_{inf}$  é o tempo de infiltração (h) e  $F$  a lâmina total infiltrada (mm).

A forma de cálculo do tempo de armazenamento considera que ocorre infiltração durante o armazenamento. Assim, o tempo de armazenamento,  $t_z$ , é definido por:

$$t_z = \frac{Z}{i_e} \quad (18)$$

onde  $Z$  é a lâmina de armazenamento na microdepressões (mm) (Equação 6) e  $i_e$  é o excesso de chuva (mm/h), estimado pela equação.

$$i_e = i - \bar{f} \quad (19)$$

Uma vez iniciado o escoamento superficial, é admitido que ele aumente linearmente com o tempo, por um período igual ao tempo de concentração da superfície. Neste ponto o escoamento atinge um máximo, permanecendo constante até que a chuva cesse. Assume-se também que a ascensão e a recessão do hidrograma são iguais. Se o tempo de duração da chuva,  $t_{ch}$ , é maior do que a soma dos tempos de retardamento,  $t_{inf}$ ,  $t_z$ ,  $t_p$ , mais o tempo de concentração,  $t_c$ , isto resulta num hidrograma com a forma de um trapézio isósceles. Se, pelo contrário, o tempo de duração da chuva é menor, o hidrograma apresenta a forma de um triângulo isósceles.

As suposições que a taxa de escoamento aumente linearmente com o tempo e que a ascensão e a recessão são iguais não é totalmente correta, no entanto, é esperado que não tenha influência significativa nos cálculos dos parâmetros de transporte de sedimentos.

Admitindo que um excesso de chuva constante possa ser definido, o tempo de concentração da superfície,  $t_c$ , pode ser determinado através da aproximação cinemática da equação do momento proposta por Woolhiser (1975 apud HARTLEY, 1987, p. 712), como segue:

$$t_c = \left( \frac{L}{\alpha i_e^{\beta-1}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (20)$$

onde  $L$  é o comprimento da superfície (m),  $i_e$  o excesso de chuva (mm/h) e  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros dependentes da natureza do escoamento, se predominantemente laminar ou turbulento. Estes parâmetros dependem do Número de Reynolds definido por:

$$R = \frac{i_e L}{2\nu} \quad (21)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água (aproximadamente igual a 3636 mm<sup>2</sup>/h para água entre 10 e 20°C).

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são determinados pela equação 22, dependendo do Número de Reynolds:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{8gS_0}{K_f \nu} & e \quad \beta &= 3,0 \quad \text{para } R \leq 700 \\ \alpha &= \left[ \frac{8gS_0}{0,0074K_f \nu^{0,25}} \right]^{0,57} & e \quad \beta &= 1,7 \quad \text{para } R > 700 \end{aligned} \quad (22)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_0$  é o seno do ângulo de inclinação da superfície e  $K_f$  é um parâmetro de resistência hidráulica, adimensional.

Hartley (1984) propôs uma equação empírica para o parâmetro de resistência hidráulica,  $K_f$ , relacionando-o à cobertura do solo, como segue (HARTLEY, 1987).

$$K_f = 60 + 3140CS^{1,65} \quad (23)$$

### Proposta de alteração/inclusão para o parâmetro de resistência hidráulica

No modelo, o parâmetro de resistência hidráulica foi calibrado e recebeu a adição de um termo que depende do tempo, em dia, da aplicação de cada teste de chuva simulada, resultando na equação:

$$K_f = ae^{-bt} + m.CS^n \quad (24)$$

onde  $t$  é o tempo decorrido, desde o tempo zero, até a aplicação de cada chuva simulada (em dias),  $CS$  é a cobertura do solo (%) e  $a, b, m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste para recomendação.

Obtida uma estimativa do tempo de concentração,  $t_c$ , a partir da equação 20, o tempo de escoamento superficial,  $t_{es}$ , pode ser determinado, no caso de o hidrograma ter a forma de um trapézio, por:

$$t_{es} = t_{ch} + t_c - t_{int} - t_z - t_p \quad (25)$$

Sabendo-se que a lâmina de escoamento, previamente determinada, deve ser igual a área sob o trapézio, o pico de descarga por unidade de área será:

$$q_{max} = \frac{r}{t_{es} - t_c} \quad (26)$$

Caso a chuva cesse antes da máxima descarga ter sido alcançada, o hidrograma assume a forma de um triângulo isósceles, e o tempo de escoamento superficial,  $t_{es}$ , é:

$$t_{es} = 2(t_{ch} - t_{int} - t_z - t_p) \quad (27)$$

e o pico de descarga é então dado por:

$$q_{max} = \frac{2r}{t_{es}} \quad (28)$$

#### 5.8.4 Determinação da capacidade de transporte de sedimentos

A capacidade de transporte de sedimentos (Equação 47) é estimada usando uma simples relação de excesso de cisalhamento.

$$c = A \left( \frac{\tau_s}{\tau_c} \right)^B \quad (29)$$

onde  $c$  é a concentração volumétrica de sedimentos (adimensional) (Equação 29),  $\tau_s$  é a tensão de cisalhamento do fluxo sobre a superfície e  $\tau_c$  é a tensão de cisalhamento crítica, baseada no critério de *Shields*;

Os valores de  $A$  e  $B$  foram estimados usando os dados de Kilinc & Richardson (1973 apud HARTELY, 1987, p. 713) e assumiram os valores de 0,00066 e 1,61, respectivamente.

Como a tensão de cisalhamento do fluxo,  $\tau_s$ , varia no tempo e no espaço durante um evento de chuva sobre a superfície, como simplificação, é proposta uma tensão de cisalhamento média ou “dominante”,  $\tau_D$ , para o evento de chuva como um todo. A equação 29 passa a ter a seguinte forma:

$$c = A \left( \frac{\tau_D}{\tau_c} \right)^B \quad (30)$$

A descarga unitária média no tempo, no final da superfície, é dada por:

$$\overline{Q}_L = \frac{rL}{t_{es}} \quad (31)$$

Em que  $t_{es}$  é determinado pela equação 25 ou equação 27, dependendo se o hidrograma assume a forma de um trapézio ou um triângulo isósceles, respectivamente.

A descarga é distribuída linearmente ao longo do comprimento da superfície, portanto, a descarga média no tempo ao longo do plano é dada pela equação 32, na qual  $x$  representa o comprimento na direção do declive.

$$\overline{Q}_x = \left( \frac{x}{L} \right) \overline{Q}_L \quad (32)$$

A tensão de cisalhamento sobre a superfície do solo em qualquer ponto é então estimada pela equação:

$$\tau_s = \left( \frac{60}{K_f} \right) \gamma h S_0 \quad (33)$$

onde  $\gamma$  é o peso específico da água, aproximadamente igual à  $9810 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$  e  $h$  é a profundidade do fluxo (mm).

De acordo com a aproximação cinemática, sabe-se que

$$h = \left( \frac{Q}{a} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (34)$$

A substituição do lado direito da equação 32 em  $Q$  na equação 34 e após, substituindo-se este resultado em  $h$  na equação 33, tem-se:

$$\bar{\tau}_x = \left(\frac{60}{K_f}\right) \gamma \left(\frac{x\bar{Q}_L}{L\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} S_0 \quad (35)$$

a qual representa a distribuição espacial da tensão de cisalhamento média no tempo sobre a superfície do solo.

Integrando a equação 35 em relação a  $x$ , e o resultado dividindo-se por  $L$ , resulta na tensão de cisalhamento média no espaço/tempo ou tensão de cisalhamento dominante,  $\tau_D$ , para um evento de escoamento.

A tensão de cisalhamento média no espaço/tempo é então:

$$\tau_D = \frac{\beta}{\beta+1} \left(\frac{60}{K_f}\right) \gamma \bar{h}_L S_0 \quad (36)$$

Onde  $\bar{h}_L$  é a profundidade média no tempo, da lâmina de escoamento no final da superfície ou profundidade do fluxo de água, e é obtido pela equação 34 com  $\bar{Q}_L$  no lugar de  $Q$ .

A tensão de cisalhamento crítica é determinada pela equação:

$$\tau_c = (\sigma - 1) \gamma \phi D_{50} \quad (37)$$

onde  $\sigma$  é a gravidade específica (densidade) média do sedimento,  $D_{50}$  é o tamanho mediano do sedimento e  $\phi$  é uma função de  $R^*$  baseado no Diagrama de Shields:

$$\phi = \frac{0,11}{R^*} + 0,0211 \log_{10} R^* \quad (38)$$

e  $R^*$  é definido por:

$$R^* = \frac{\sqrt{\tau_D} D_{50}}{v} \quad (39)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido, no caso a água e  $v$  é a viscosidade da água.

Para estimar-se o  $D_{50}$ , primeiramente é necessário ter uma estimativa da distribuição do tamanho e da gravidade específica das partículas no sedimento. Foster et al. (1985), apresentaram uma série de equações relacionando a distribuição do tamanho de partículas do sedimento à distribuição dos constituintes primários da matriz do solo.

A Tabela 5 apresenta resultados da distribuição de tamanho e gravidade específica das partículas do sedimento, aplicando-se as equações apresentadas por Foster et al. (1985). A partir das equações são calculados a fração do sedimento em 5 classes de partículas: argila, silte, pequenos agregados, grandes agregados e areia.

Tabela 5 – Distribuição do tamanho de partículas desagregadas e suas densidades

Classe de partícula	Tamanho (mm)	Gravidade específica	Fração no sedimento
Argila	0,002	2,65	Eq. 40
Silte	0,01	2,65	Eq. 42
Pequenos agregados	Eq. 45	1,8	Eq. 41
Grandes agregados	Eq. 46	1,6	Eq. 44
Areia	0,2	2,65	Eq. 43

Fonte: (HARTLEY, 1987)

As equações indicadas na Tabela 5 referem-se àquelas apresentadas por Foster et al. (1985), e estão apresentadas a seguir:

A fração argila do sedimento,  $F_{ag}$ , é dada por:

$$F_{ag} = 0,26O_{ag} \quad (40)$$

no qual,  $O_{ag}$  é a fração de argila na matriz do solo.

A fração pequenos agregados,  $F_{pa}$ , no sedimento, também está relacionada à fração argila, e é dada pela equação 41:

$$\begin{aligned} F_{pa} &= 1,80 & O_{ag} &< 0,25 \\ F_{pa} &= 0,45 - 0,6(O_{ag} - 0,25) & 0,25 &\leq O_{ag} \leq 0,50 \\ F_{pa} &= 0,60 & O_{ag} &> 0,50 \end{aligned} \quad (41)$$

A fração silte,  $F_{si}$ , no sedimento é dada por:

$$F_{si} = O_{si} - F_{pa} \quad (42)$$

no qual  $O_{si}$  é a fração silte na matriz do solo. Se a equação 42 produzir um resultado negativo,  $F_{si}$  é então tomado como zero e  $F_{pa}$  é então tomado igual a  $O_{si}$ , rearranjando a equação.

A fração areia,  $F_{ar}$ , é dada por:

$$F_{ar} = O_{ar}(1 - O_{ag})^5 \quad (43)$$

onde,  $O_{ar}$  é a fração areia na matriz do solo.

A fração grandes agregados,  $F_{ga}$ , é determinada por subtração pela equação:

$$F_{ga} = 1 - F_{ag} - F_{si} - F_{pa} - F_{ar} \quad (44)$$

Se o resultado da equação 44 for um valor negativo, as frações do lado direito da equação serão reduzidas por um fator igual, de modo que  $F_{ga}$  seja igual a zero.

O diâmetro da classe pequenos agregados,  $D_{pa}$  é determinado pela equação 45:

$$\begin{aligned} D_{pa} &= 0,3 & O_{ag} < 0,25 \\ D_{pa} &= 0,2(O_{ag} - 0,25) + 0,3 & 0,25 \leq O_{ag} \leq 0,60 \\ D_{pa} &= 0,1 & O_{ag} > 0,60 \end{aligned} \quad (45)$$

O diâmetro dos grandes agregados,  $D_{ga}$ , é dado pela equação 46:

$$\begin{aligned} D_{ga} &= 0,3 & O_{ag} < 0,15 \\ D_{ga} &= 2 \cdot O_{ag} & O_{ag} > 0,15 \end{aligned} \quad (46)$$

A densidade específica média,  $\sigma$ , é obtida a partir da soma dos valores individuais de cada classe, ponderado pela respectiva fração no sedimento.

O diâmetro mediano,  $D_{50}$ , pode então ser obtido através da curva granulométrica.

A capacidade de transporte de sedimentos,  $Y_c$ , em termos de massa seca por unidade de área, pode ser determinada por:

$$Y_c = 2,65\rho cr \quad (47)$$

### 5.8.5 Capacidade de desagregação da chuva e do escoamento superficial

A taxa de desagregação de partículas pelo impacto das gotas de chuva é assumida como diretamente relacionada ao “input” de

energia da chuva na superfície do solo, o qual é determinado a partir de uma relação empírica adaptada com base na USLE, Wischmeier & Smith (1978 apud HARTLEY, 1987, p. 714).

$$E_{ch} = i(11,9 + 8,7 \log_{10} i) \quad (48)$$

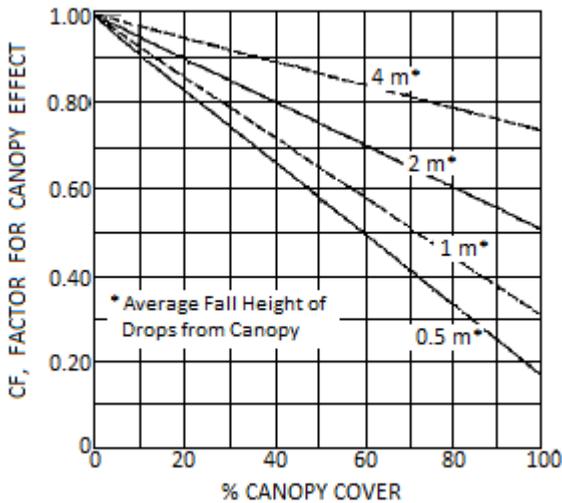
no qual,  $E_{ch}$ , dada pela equação 48, é a taxa de energia da chuva por unidade de área em gramas por metro quadrado por hora e  $i$  é a intensidade da chuva, em milímetros por hora.

A taxa de desagregação do solo pelo impacto das gotas de chuva é dada por:

$$G_{ch} = E_{ch}(1 - CS).CF.D \quad (49)$$

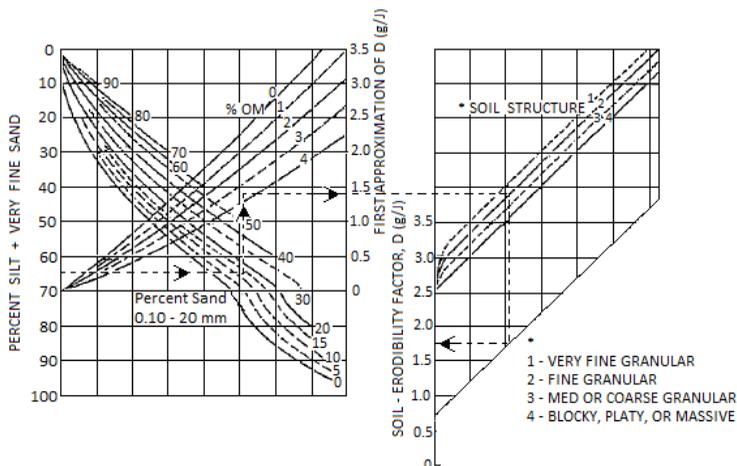
na qual,  $G_{ch}$  é a massa de solo desagregada por unidade de área em gramas por metro quadrado por hora,  $CS$  é a fração cobertura do solo,  $CF$  é um fator de cobertura vegetal (Figura 5) e  $D$  é um fator de erodibilidade do solo determinados com base em Wischmeier & Smith (1978 apud HARTLEY, 1987, 715) (Figura 6).

Figura 5 – Fator cobertura vegetal, CF.



Fonte: (HARTLEY, 1987)

Figura 6 – Nomograma para o fator de erodibilidade do solo



Fonte: (HARTLEY, 1987)

A taxa média de “input” de energia sobre a superfície do solo é dada pela equação:

$$E_{es} = \left(\frac{60}{K_f}\right) \gamma \frac{\overline{Q_L}}{2} S_0 \quad (50)$$

Como uma primeira aproximação, o modelo assume que a erodibilidade do solo pela enxurrada é igual à erodibilidade do solo pela chuva e, a taxa de desagregação do solo pela enxurrada é:

$$G_{es} = E_{es} \cdot D \quad (51)$$

na qual,  $G_{es}$  tem as mesmas dimensões de  $G_{ch}$ .

Quando  $G_{ch}$  e  $G_{es}$  são expressos nas mesmas unidades, a quantidade de sedimento disponível, em termos de massa seca por unidade de área, é então dada pela equação:

$$Y_s = G_{ch} \cdot t_{ch} + G_{es} \cdot t_{es} \quad (52)$$

Os valores de quantidade de sedimentos disponível,  $Y_s$ , equação 52 e capacidade de transporte de sedimentos,  $Y_c$ , equação 47 são então comparados. O menor dos dois representa a taxa de produção de sedimento para o evento de chuva considerado.

## 5.9 ÍNDICES DE EFICIÊNCIA DO MODELO

Uma vez que os parâmetros do modelo foram estimados, deve-se verificar o quanto das variações da variável dependente  $Y$ , podem ser explicadas pelas variações nas variáveis independentes  $X$ .

A precisão do modelo será dada pelo coeficiente de correlação ( $R$ ). É um índice estatístico que indica o grau de dispersão dos dados em relação a uma reta de regressão entre os valores de perda de água e solo estimados pelo modelo e medidos no campo (BIUDES et al., 2008).

A concordância, por sua vez, se refere à exatidão ou a aproximação dos dados estimados aos observados. Para quantificar matematicamente esta aproximação, Willmott (1982 apud BIUDES et al., 2008, p. 77) propôs um coeficiente de concordância ( $d$ ) (Equação 53), que se refere à exatidão dos dados ou a proximidade entre eles. Seus valores variam de 0, para nenhuma concordância, até 1, para a máxima concordância.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_e - Y_o)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_e - \bar{Y}| + |Y_o - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (53)$$

onde  $d$  é o índice de concordância,  $Y_e$  são os valores estimados pelo modelo,  $Y_o$  os valores observados e  $\bar{Y}$  é a média dos valores observados.

O índice de confiança ( $c$ ), (Equação 54), sintetiza de forma conjunta os resultados dos índices de concordância ( $d$ ) e de correlação ( $R$ ). Seus valores variam de 0 (zero) para nenhuma confiança à 1 (um) para confiança perfeita (BIUDES et al., 2008)

$$c = R \cdot d \quad (54)$$

O critério adotado para interpretar o desempenho do modelo, avaliado a partir do índice de confiança ( $c$ ), para os valores de perda de água e solo, estão representados na Tabela 6, (BIUDES et al., 2008).

Tabela 6 – Critério de interpretação do desempenho do modelo, baseado no índice de concordância ( $c$ ).

Valores de ( $c$ )	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 40	Péssimo

Fonte: (BIUDES et al., 2008).

## 5.10 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração tem como objetivo definir os valores dos parâmetros do modelo que permitam determinar valores simulados mais próximos aos valores observados.

Segundo Bravo et al. (2007), a calibração é uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo são modificados pelo usuário ou através de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída.

As técnicas de otimização nas quais os valores dos parâmetros do modelo são modificados pelo usuário, também chamada de tentativa e erro, onde o usuário altera parâmetros de uma ou mais equações e compara os resultados obtidos em cada iteração com os resultados medidos a campo, cujo objetivo é verificar se o modelo consegue repetir, nas suas simulações, os dados observados. Se a resposta for positiva, as iterações continuam nesta direção, do contrário, retoma-se o processo e adota-se um novo caminho. Esse processo iterativo é dinâmico e prossegue até que o usuário encontre um conjunto de parâmetros para os quais ele considera que os resultados do modelo são os mais apropriados para o processo simulado. Uma das grandes vantagens desse procedimento é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo (BRAVO et al., 2007).

Segundo Tucci (2005), este procedimento tem alguns inconvenientes, pois dependem do grau de subjetividade no ajuste dos parâmetros e do grau de familiaridade do usuário com o modelo e sua experiência com relação à modelagem e também ao que se está

modelando. Porém, tem as vantagens de que o usuário possa identificar erros grosseiros e detalhados à medida que examina as saídas do modelo e melhora o entendimento do usuário de todos os processos envolvidos.

No momento em que o usuário considere que os resultados obtidos são bons, será então gerado um conjunto de parâmetros que deverão ser utilizados posteriormente na etapa de validação do modelo.

Como representado na Figura 2, os experimentos 1 e 4 foram utilizados para a calibração do modelo. O experimento 1 para calibração dos experimentos conduzidos na Área Experimental I e o experimento 4 para os experimentos conduzidos na Área Experimental II, respectivamente. Os experimentos 2 e 3 foram utilizados para a validação na Área Experimental I, enquanto que o experimento 5 foi utilizado para a validação na Área Experimental II.

No processo de calibração foram obtidos os parâmetros de ajuste para a equação 24.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO/INCLUSÃO AO MODELO ORIGINAL

No modelo original, algumas equações foram incluídas/modificadas, hora para tornar o modelo mais dinâmico, hora para atender situações pontuais. Visando maior clareza na discussão a ser feita em seguida, inicialmente, serão descritas quais foram as alterações/inclusões sugeridas e suas respectivas justificativas para, melhor suportar a discussão dos resultados e as simulações realizadas.

#### 6.1.1 Lâmina de interceptação

Para estimar a lâmina de interceptação, o modelo simplificado proposto por Hartley (1987) utiliza a equação 4. Embora  $I_{max}$  varie com o tipo de vegetação, é assumida como 3,5 mm, para uma máxima densidade de cobertura. A máxima densidade de cobertura do solo pode ser obtida pelo somatório das coberturas vegetal e residual ou simplesmente quando um destes parâmetros já contempla a máxima densidade de cobertura. Na hipótese de que a máxima densidade seja atribuída apenas à cobertura vegetal, é natural se esperar que a lâmina de interceptação seja de, no máximo, 3,5 mm. A equação 5 foi incluída no modelo por dois motivos: primeiro, para justificar a adoção da interceptação máxima em 3,5 mm e, segundo, para possibilitar ao usuário do modelo que, dispondo de dados de área foliar e seus respectivos índices, para as culturas estudadas, incluir estes dados nas suas simulações.

Alguns autores, estudando as aplicações da equação 5, obtiveram valores para a interceptação máxima pela cobertura vegetal, em função do índice de área foliar, variando de 1,19 mm a 3,73 mm (Tabela 7). Considerando os valores médios (1,31 a 3,53 para o IAF e 2,79 para  $I_{max}$ ), é razoável que o modelo assumira uma interceptação máxima pela cobertura vegetal ( $I_{max}$ ) de 3,5 mm sem que isso comprometa as estimativas de perda de água estimadas.

Tabela 7 – Índice de área foliar (IAF) e Interceptação máxima pela cobertura vegetal ( $I_{max}$ ) para algumas culturas

Autor	Cultura	IAF	$I_{max}$ (mm)
(HEIFFIG et al., 2006)	Soja	0,50 a 3,20	2,59
(URCHEI et al., 2000)	Feijão	1,96 a 5,13	3,64
(ALMEIDA et al., 2003)	Milho	0,28 a 0,49	1,19
(KUNS et al., 2007)	Milho	2,5 a 5,3	3,73
média		1,31 a 3,53	2,79

Fonte: Próprio autor

### 6.1.2 Lâmina de armazenamento nas microdepressões

No modelo simplificado (HARTLEY, 1987), a lâmina de armazenamento nas microdepressões era determinada a partir dos dados da Tabela 3. Esta metodologia apresenta o inconveniente de que seus dados são totalmente discretos. A adoção da equação 6, definida por Onstad (1984), torna as estimativas mais dinâmicas e de forma contínua, é de fácil utilização e os dados que alimentam a equação podem ser obtidos experimentalmente no campo. Um dos parâmetros que alimenta a equação, a rugosidade aleatória ou randômica, pode ser determinado de forma quantitativa, utilizando-se um “rugosímetro de agulhas”, ou podem ser obtidos qualitativamente a partir das recomendações do *Agriculture Handbook Number 703* (RENARD et al., 2000).

### 6.1.3 Lâmina total infiltrada

No modelo simplificado, a determinação da lâmina total infiltrada,  $F$ , foi estimada usando-se o modelo de infiltração descrito por Smith & Parlange (1978) (HARTLEY, 1987). No entanto, os resultados obtidos com o uso das equações 7 a 13, não foram consistentes. As maiores dificuldades foram encontradas nos parâmetros relacionados à pressão capilar,  $H$ , e a condutividade de solo saturado,  $K_s$ . A relação entre estes dois parâmetros (Tabela 4), baseada em Rawls et al. (1982), embora tenha fundamento físico, não se mostraram efetivos, para os solos estudados.

No modelo, a lâmina total infiltrada,  $F$ , foi estimada utilizando-se o modelo de infiltração empírico proposto por Horton. O modelo de Horton descreve a taxa de infiltração instantânea em função do tempo, equações 14 e 15 (BRANDÃO et al., 2006).

O modelo de infiltração proposto por Horton foi escolhido por ser amplamente difundido e apresenta resultados, nas suas estimativas, muitas vezes superior a outros modelos existentes.

Sobrinho et al. (2003), trabalhando sob chuva simulada com simulador de chuvas portátil, denominado infiltrômetro de aspersão InfiAsper, em um Latossolo Vermelho distroférico, em Dourados (MS), concluíram que o modelo empírico de Horton é melhor estimador para a taxa de infiltração do que o modelo de Kostiakov – Liwes.

Da Paixão et al. (2009), trabalhando com infiltrômetro de anel (15 cm de diâmetro) na superfície do solo, em um Neossolo Regolítico, em Lagoa Seca (PB), concluíram que o modelo de Horton foi o que apresentou melhores estimativas da velocidade de infiltração, se comparado ao modelo de Kostiakov e Kostiakov-Lewis.

Serão descritos a seguir os procedimentos realizados para a determinação dos parâmetros que alimentam as equações de Horton: A taxa de infiltração estável ( $f_c$ ) e o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração ( $\phi$ ).

### **6.1.3.1 Determinação da taxa de infiltração estável**

Para as equações de Horton, a taxa de infiltração estável,  $f_c$ , representa a assíntota horizontal à curva  $f \times t$  (taxa de infiltração x tempo). A taxa de infiltração estável,  $f_c$ , foi obtida a partir dos experimentos 1 e 4. No experimento 1, foram realizados cinco testes de chuva simulada sobre os cinco tratamentos, totalizando 25 chuvas. Os anexos B à F apresentam os gráficos de taxa de infiltração no tempo,  $t$ , observada no campo e estimada por Horton, para todos os tratamentos deste experimento.

Para o experimento 4, foram realizados quatro testes de chuva simulada sobre quatro tratamentos, totalizando 16 chuvas. Os anexos P e Q apresentam os gráficos de taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada por Horton, para todos os tratamentos deste experimento.

Os valores observados graficamente, para a taxa de infiltração estável,  $f_c$ , para os experimentos 1 e 4, constam nos anexos A e O, respectivamente.

### 6.1.3.2 Determinação do parâmetro de decaimento da taxa de infiltração

O parâmetro de ajuste da equação de Horton, que mede o decaimento da taxa de infiltração ( $\varphi$ ), foi obtido a partir dos dados de infiltração tempo a tempo para os experimentos 1 e 4. Os anexos G a K apresentam os gráficos  $(f - f_c) \times t$  para o experimento 1, enquanto que os anexos R e S apresentam os gráficos  $(f - f_c) \times t$  para o experimento 4. Nestes gráficos, o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\varphi$ , é a declividade da curva de  $(f - f_c) \times t$ , representada pelo expoente da equação de regressão para os dados observados. O expoente negativo, nesta equação, indica que a taxa de infiltração decai com o tempo. Os valores, observados nos gráficos, para a taxa de decaimento da infiltração,  $\varphi$ , para os experimentos 1 e 4, constam nos anexos L e T, respectivamente.

### 6.1.4 Parâmetro de resistência hidráulica

O parâmetro de resistência hidráulica,  $k_f$ , no modelo simplificado proposto por Hartley (1987), dado pela equação 23, foi determinado empiricamente a partir dos estudos realizados, pelo próprio autor, para oito diferentes densidades de cobertura do solo.

Esta equação, entretanto, apresentou alguns problemas nas simulações, principalmente o tratamento solo sem cultivo e descoberto. Neste tratamento, o parâmetro de resistência hidráulica se tornou constante, independente do tempo, já que a cobertura do solo era sempre nula. No entanto, houve, com o passar do tempo, um incremento nas perdas de solo, para este tratamento, que o modelo original não era capaz de estimar.

As perdas de solo observadas no campo, para o tratamento solo sem cultivo e descoberto, para o experimento 1 aumentaram com a aplicação dos testes de chuva simulada. As perdas de solo, que no primeiro teste de chuva simulada, foram estimadas em 5,5 t/ha, aumentaram para 8,0 t/ha no segundo, um aumento, portanto, em torno de 1,5 vezes. Este aumento foi ainda mais expressivo nos testes seguintes: 3,9; 5,7 e 4,3 vezes no terceiro, quarto e quinto teste de chuva simulada, respectivamente (Tabela 18). Situação semelhante pode ser observada no experimento 2. Para o cultivo do milho as perdas de solo foram de 1,1 t/ha no primeiro teste de chuva simulada. No segundo e terceiro testes, as perdas de solo aumentaram 8,5 e 8,7

vezes, respectivamente. Enquanto que para a cultura do feijão esta variação foi ligeiramente inferior. No primeiro teste de chuva simulada, as perdas de solo foram de 23,3 t/ha e aumentaram 1,1 e 1,2 vezes no segundo e terceiro testes, respectivamente (Tabela 20). No entanto, independente da cultura e da variação observada, observa-se que houve aumento nas perdas de solo decorrentes do tempo transcorrido entre os testes de chuva simulada, para o tratamento solo sem cultivo e descoberto.

A ausência de cobertura do solo por resíduos culturais, e o revolvimento periódico do solo, no tratamento solo sem cultivo e descoberto, permitiu que as gotas da chuva atingissem diretamente a superfície do solo, provocando a formação de selamento superficial, reduzindo a taxa de infiltração de água e provocando aumento nas perdas de solo e água. As chuvas naturais e simuladas formaram sulcos na camada superficial do solo no tratamento solo sem cultivo e descoberto, o que aumentou a capacidade de desagregação, o volume da enxurrada e o transporte de partículas do solo pela enxurrada (ENGEL, 2005; LEITE et al., 2004).

A calibração da equação 23, foi efetuada com os dados de perdas de solo do experimento 1, e gerou a equação 24. A nova equação, além das sugestões aos parâmetros encontrados empiricamente por Hartley (1984 apud HARTLEY, 1987, p. 712), foi acrescida de um fator redutor, que depende do tempo transcorrido entre uma e outra aplicação dos testes de chuvas simuladas.

A calibração da equação 23 foi efetuada por tentativa e erro, como descrito no item 5.10, e estimados os parâmetros de ajuste para a equação.

Para os experimentos 1 e 2, os parâmetros de ajuste da equação 23 foram:  $a = 21,95$ ,  $b = 0,011$ ,  $m = 4800$  e  $n = 1,35$ .

## 6.2 PERDAS DE ÁGUA

Para estimar as perdas de água o modelo leva em consideração: dados de chuva simulada (intensidade e duração), de cobertura do solo (vegetal e residual), das parcelas experimentais (declividade e comprimento), de manejo (a rugosidade aleatória) e também a taxa de infiltração estável. Todos estes dados foram obtidos a campo.

As estimativas de perdas de água foram determinadas levando em consideração as propostas incorporadas ao modelo previamente descritas no capítulo 5.

## **6.2.1 Perdas de água para os experimentos conduzidos na área experimental I**

### **6.2.1.1 Experimento 1 (Calibração)**

Os resultados parciais, das simulações, desenvolvidas com base nos dados do experimento 1, estão mostrados na Tabela 8. As estimativas da lâmina de armazenamento nas microdepressões foram determinadas a partir da equação 6, com base nos dados de rugosidade aleatória e declividade das parcelas experimentais (ANEXO A). As estimativas da lâmina de interceptação foram obtidas utilizando-se a equação 4, com base nos dados de cobertura do solo, residual e vegetal (ANEXO A). As estimativas da lâmina total infiltrada foram determinadas utilizando o modelo de Horton com base nos dados de taxa de infiltração estável,  $f_c$ , e da taxa de infiltração inicial,  $f_0$  (ANEXO A) e do parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\varphi$  (ANEXO L).

Na Tabela 9 são apresentadas as perdas de água observadas no campo e estimadas pelo modelo. As perdas de água estimadas pelo modelo foram determinadas utilizando-se a equação 3, levando em consideração os resultados parciais mostrados na Tabela 8 e os dados de precipitação (ANEXO A). Os testes de chuva simulada neste experimento tinham duração de 1 hora. A equação de regressão e o coeficiente de correlação são apresentados na Figura 7.

Tabela 8 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões (**Z**), lâmina de interceptação (**I**) e lâmina total infiltrada (**F**).

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
..... mm .....					
Lâmina de armazenamento nas microdepressões, <i>Z</i>					
SSC	7,23	2,09	3,24	2,03	1,16
PCO	7,25	3,24	3,24	2,04	1,16
SDDQ	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
SDT	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
SDD	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Lâmina de interceptação, <i>I</i>					
SSC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCO	0,46	2,07	3,26	3,50	3,50
SDDQ	1,96	3,50	3,50	3,50	3,50
SDT	2,80	3,50	3,50	3,50	3,50
SDD	2,63	3,50	3,50	3,50	3,50
Lâmina total infiltrada, <i>F</i>					
SSC	34,33	30,93	26,64	27,68	22,29
PCO	33,99	33,03	33,29	35,71	35,11
SDDQ	32,55	31,88	36,81	40,21	47,43
SDT	44,91	36,20	37,59	45,12	52,52
SDD	39,20	31,69	34,23	39,69	43,93

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005).

Tabela 9 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo.

Tratamento	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4		Teste 5	
	Est	Obs								
..... mm .....										
SSC	22,6	19,2	32,3	22,2	35,2	29,3	34,4	30,2	39,6	30,9
PCO	24,7	25,9	28,6	30,8	24,6	22,6	24,2	23,6	23,6	22,8
SDDQ	30,0	25,6	30,6	27,5	24,0	21,6	21,7	21,3	13,6	17,7
SDT	17,1	15,8	26,9	25,1	21,2	19,1	15,0	13,0	9,7	8,7
SDD	23,3	20,6	28,4	25,9	25,0	21,1	19,3	14,7	16,9	15,1

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; Est: Estimadas pelo modelo; Obs: Observadas no Campo. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

### 6.2.1.2 Experimento 2 (Validação)

As estimativas da lâmina de armazenamento nas microdepressões, lâmina de interceptação e a lâmina total infiltrada, para o experimento 2 (Tabela 10), foram obtidas de forma semelhante a descrita para o experimento 1. Foram utilizados os dados constantes no anexo M e o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi$ , recomendados para estes tratamentos (ANEXO L). O parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi$ , para o tratamento CNM (campo nativo melhorado) foi atribuído o mesmo valor do tratamento SDD (semeadura direta sobre resíduos dessecados quimicamente).

Tabela 10 – Estimativas de lâmina de armazenamento na microdepressões (**Z**), lâmina de interceptação (**I**) e lâmina total infiltrada (**F**).

	SSC	PCO	SDDQ	SDI	SDD	CNM
..... mm .....						
Cultivo do milho						
Lâmina de armazenamento nas microdepressões						
Teste 1	7,23	7,25	1,15	1,16	1,15	1,16
Teste 2	3,24	3,24	1,15	1,16	1,15	1,16
Teste 3	3,24	3,24	1,15	1,16	1,15	1,16
Lâmina de interceptação						
Teste 1	0,00	0,35	1,26	2,80	3,15	3,50
Teste 2	0,00	2,42	2,98	3,50	3,50	3,50
Teste 3	0,00	3,15	3,47	3,50	3,50	3,50
Lâmina de infiltração						
Teste 1	47,09	55,09	49,46	75,99	46,09	75,75
Teste 2	38,71	51,73	30,10	56,21	27,51	50,55
Teste 3	62,16	131,78	84,40	152,19	116,55	71,55
Cultivo do feijão						
Lâmina de armazenamento nas microdepressões						
Teste 1	7,23	7,25	1,15	1,16	1,15	1,16
Teste 2	3,24	3,24	1,15	1,16	1,15	1,16
Teste 3	3,24	3,24	1,15	1,16	1,15	1,16
Lâmina de interceptação						
Teste 1	0,00	0,46	0,84	3,33	3,43	3,50
Teste 2	0,00	0,70	1,09	3,50	3,50	3,50
Teste 3	0,00	1,96	2,10	3,50	3,50	3,50
Lâmina de infiltração						
Teste 1	23,09	24,26	34,30	49,45	33,64	35,37
Teste 2	40,98	52,33	52,88	79,70	60,00	58,96
Teste 3	26,58	56,11	50,47	92,56	75,89	55,05

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; CNM: Campo nativo melhorado. Fonte: Próprio autor. Nota: com base nos dados de Leite (2003).

As perdas de água observadas no campo e estimadas pelo modelo para o experimento 2 (Tabela 11), foram obtidas de forma semelhante as descritas para o experimento 1, levando em consideração os resultados parciais mostrados na Tabela 10 e anexo M. A equação de regressão e o coeficiente de correlação estão apresentados na Figura 7.

Tabela 11 – Perdas de água por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo.

	SSC		PCO		SDDQ		SDI		SDD		CNM	
	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs
..... mm .....												
Cultivo do milho												
Teste 1	28,5	24,8	19,5	11,5	34,4	20,7	5,3	3,4	28,0	14,9	22,8	8,3
Teste 2	21,2	20,8	22,1	13,5	34,7	30,3	9,0	7,0	35,7	29,2	17,4	17,4
Teste 3	25,4	16,3	3,5	2,8	15,1	4,2	2,9	1,6	23,4	5,8	24,3	14,1
Cultivo do feijão												
Teste 1	30,5	30,4	33,3	30,7	27,1	24,1	13,0	8,7	25,7	26,2	19,9	25,8
Teste 2	48,0	29,5	40,0	25,0	40,9	23,0	16,0	8,0	30,0	16,1	59,3	35,6
Teste 3	70,1	45,0	49,8	30,0	45,6	25,8	10,9	5,4	31,8	13,5	42,6	25,6

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; CNM: Campo nativo melhorado; Est: Estimado pelo modelo; Obs: Observado no campo. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Leite (2003).

### 6.2.1.3 Experimento 3 (Validação)

As estimativas da lâmina de armazenamento nas microdepressões, lâmina de interceptação e a lâmina total infiltrada (Tabela 12), foram determinadas da mesma forma que aquelas descritas para o experimento 1 e foram utilizados os dados constantes do anexo N. A cobertura vegetal foi nula para todos os tratamentos em função dos objetivos dos experimentos realizados por Barbosa (2011), o qual investigou apenas a resistência do resíduo sobre a superfície do solo ao fluxo superficial. Portanto, para o cálculo da interceptação foi levado em consideração apenas a cobertura do solo pelos resíduos vegetais.

Foi adotado o valor constante de 8,71, para o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração (ANEXO L), referente ao tratamento de semeadura direta tradicional, SDT, para todos os tratamentos, já que este era o tratamento que mais se aproximava dos tratamentos estudados por Barbosa (2011).

A Tabela 12 traz ainda as perdas de água observadas no campo e estimadas pelo modelo. Na Figura 9 é apresentada a equação

de regressão e o coeficiente de correlação para os valores de perda de água observados e estimados pelo modelo.

Tabela 12 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões (*Z*); lâmina de interceptação (*I*); lâmina total infiltrada por Horton (*F*); PAE: perdas de água estimadas pelo modelo (mm); PAO: perdas de água observadas no campo (mm).

Tratamento	<i>Z</i>	<i>I</i>	<i>F</i>	PAE	PAO
Experimento A: resíduo de milho					
C-M <sub>1/1</sub>	2,03	3,22	42,72	50,17	42,35
C-M <sub>1/2</sub>	2,03	2,54	49,46	43,77	32,65
P-M <sub>1/1</sub>	2,03	3,20	38,71	54,19	49,65
P-M <sub>1/2</sub>	2,03	2,52	48,12	45,13	37,05
Experimento B: resíduo de trigo					
C-T <sub>1/1</sub>	2,03	2,38	58,16	35,81	28,85
C-T <sub>1/2</sub>	2,03	1,79	52,52	41,44	30,75
P-T <sub>1/1</sub>	2,03	2,33	52,52	41,21	33,60
P-T <sub>1/2</sub>	2,03	1,91	49,49	44,06	31,50
Experimento C: resíduo de soja					
C-S <sub>1/1</sub>	2,03	2,77	48,41	45,06	34,90
C-S <sub>1/2</sub>	2,03	2,26	47,14	46,65	33,25
P-S <sub>1/1</sub>	2,03	2,78	48,14	45,01	33,85
P-S <sub>1/2</sub>	2,03	2,26	48,24	45,27	32,25

C-Semeadura em contorno ao declive; P-Semeadura no sentido da pendente; M-Resíduo de milho; T-Resíduo de trigo; S-Resíduo de soja; <sub>1/1</sub>-Dose de resíduo de 100% do total produzido; <sub>1/2</sub>-Dose de resíduo de 50% do total produzido. (Média das repetições). Fonte: Próprio autor. Nota: Estimativas realizadas com base nos dados de Barbosa (2011).

## 6.2.2 Perdas de água para os experimentos conduzidos na área experimental II

### 6.2.2.1 Experimento 4 (Calibração)

As estimativas da lâmina de armazenamento nas microdepressões, lâmina de interceptação e a lâmina total infiltrada (Tabela 13), foram determinadas da mesma forma que aquelas descritas para o experimento 1 e foram utilizados os dados constantes dos anexos O e T.

Tabela 13 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões (**Z**), lâmina de interceptação (**I**) e lâmina total infiltrada (**F**).

Tratamentos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
..... mm .....				
Lâmina de armazenamento nas microdepressões ( <b>Z</b> )				
SDSD	3,24	3,24	1,16	1,16
SDSC	3,24	3,24	1,16	1,16
SDMD	3,24	3,24	1,16	1,16
SDMC	3,24	3,24	1,16	1,16
Lâmina de interceptação ( <b>I</b> )				
SDSD	2,78	3,45	3,50	3,03
SDSC	2,69	3,50	3,50	3,50
SDMD	3,50	3,50	3,50	3,50
SDMC	3,50	3,50	3,50	3,50
Lâmina total infiltrada ( <b>F</b> )				
SDSD	16,90	13,88	17,69	13,27
SDSC	29,88	17,79	32,25	23,45
SDMD	19,12	13,93	14,74	13,18
SDMC	21,57	21,82	37,76	24,53

SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

As perdas de água estimadas pelo modelo e observadas no campo foram obtidas de forma semelhante aquelas descritas no experimento 1 (Tabela 14), levando em consideração os resultados parciais mostrados na Tabela 13 e anexo O. A equação de regressão e o coeficiente de correlação estão apresentados na Figura 7.

Tabela 14 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo.

Tratamentos	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4	
	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs
..... mm .....								
SDSD	88,21	87,12	76,11	84,01	73,86	59,46	80,69	85,40
SDSC	68,72	69,30	73,72	83,32	62,92	51,71	66,84	69,79
SDMD	86,65	85,17	75,38	81,16	76,81	59,55	76,42	73,15
SDMC	74,82	62,80	70,33	77,32	57,41	36,04	69,68	40,24

SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno; Est: estimadas pelo modelo; Obs: observadas no campo. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

### 6.2.2.2 Experimento 5 (Validação)

As estimativas da lâmina de armazenamento nas microdepressões, lâmina de interceptação e a lâmina total infiltrada (Tabela 15), foram determinadas da mesma forma que aquelas descritas para o experimento 1.

Tabela 15 – Estimativas de lâmina de armazenamento nas microdepressões (**Z**), lâmina de interceptação (**I**) e lâmina total infiltrada (**F**).

Tratamentos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
..... mm .....				
Lâmina de armazenamento nas microdepressões ( <b>Z</b> )				
Milho	3,24	3,24	1,16	1,16
Soja	3,24	3,24	1,16	1,16
Feijão	3,24	3,24	1,16	1,16
Milho/Feijão	3,24	3,24	1,16	1,16
Lâmina de interceptação ( <b>I</b> )				
Milho	3,15	2,63	3,50	3,50
Soja	3,08	2,45	3,50	3,50
Feijão	3,15	2,73	3,50	2,28
Milho/Feijão	3,22	2,80	3,50	3,50
Lâmina total infiltrada ( <b>F</b> )				
Milho	33,64	27,41	33,88	21,37
Soja	32,75	27,45	36,08	22,85
Feijão	39,59	29,41	23,27	17,88
Milho/Feijão	36,37	25,24	24,11	18,01

Milho solteiro; Soja solteira; Feijão solteiro; Milho consorciado com feijão. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Bertol et al. (2013)

Para a estimativa dos valores da Tabela 15 foram utilizados os dados constantes do anexo U e o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\varphi$ , recomendados para estes tratamentos (ANEXO T). Para os tratamentos, milho solteiro e milho consorciado com feijão foi atribuído o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\varphi$ , do tratamento SDMC (semeadura direta de milho em contorno) e para os tratamentos, soja e feijão solteiros foi atribuído o parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\varphi$ , do tratamento SDSC (semeadura direta de soja em contorno).

As perdas de água observadas no campo e estimadas pelo modelo para o experimento 5 (Tabela 16), foram obtidas de forma

semelhante as descritas para o experimento 1, levando em consideração os resultados parciais mostrados na Tabela 10 e anexo U. A equação de regressão e o coeficiente de correlação estão apresentados na Figura 7.

Tabela 16 – Perdas de água, por escoamento superficial, estimadas pelo modelo e observadas no campo.

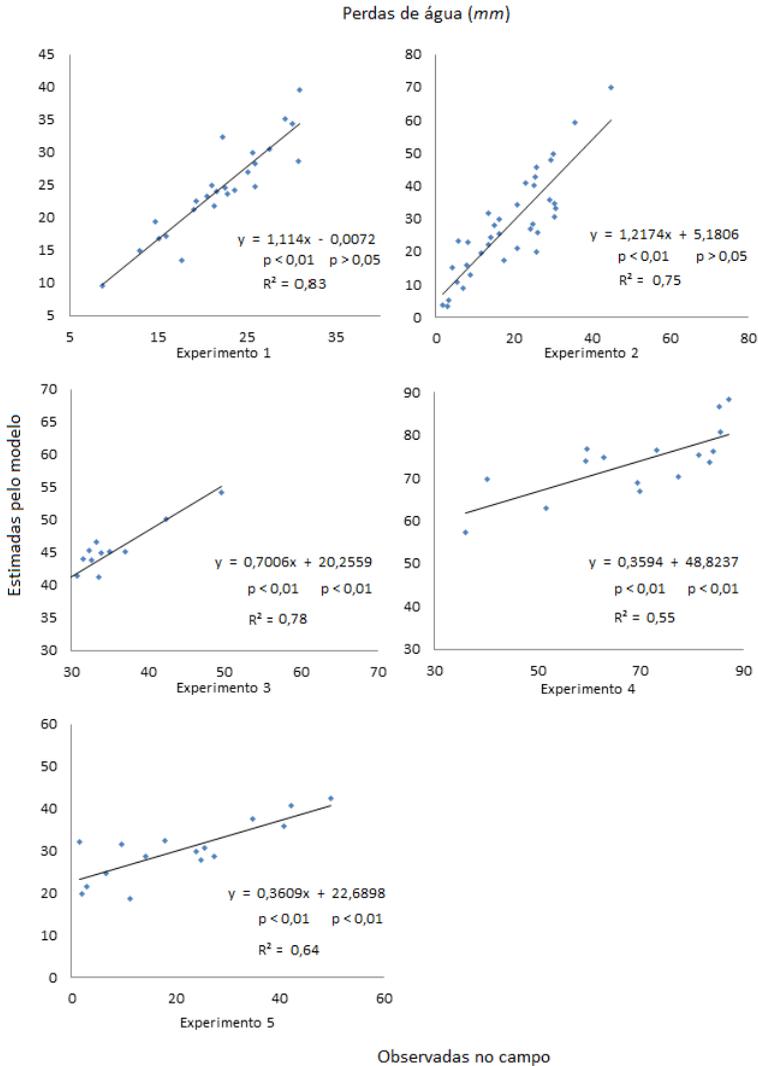
Tratamentos	Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4	
	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs
	mm							
Milho	24,62	6,72	29,92	23,95	21,65	2,83	37,67	34,84
Soja	32,53	17,90	28,86	27,40	19,76	2,06	35,88	40,83
Feijão	18,72	11,13	27,82	24,77	32,27	1,51	42,38	49,81
Milho/Feijão	28,77	14,18	30,73	25,54	31,73	9,62	40,73	42,22

Milho solteiro; Soja solteira; Feijão solteiro; Milho consorciado com feijão; Est: Estimado pelo modelo; Obs: Observado no campo. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Bertol et al. (2013)

### 6.2.3 Equações de regressão e coeficiente de correlação para as perdas de água observadas e estimadas pelo modelo

A figura 7 apresenta o coeficiente de correlação e a equação de regressão para os dados de perda de água observados no campo e estimados pelo modelo. Analisando os gráficos pode-se observar que há correlação linear positiva entre os valores de perda de água observados e os estimados pelo modelo para todos os experimentos. Pode-se afirmar ainda que os coeficientes de inclinação de todas as equações ajustadas foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste t. Ainda, observa-se que apenas os interceptos das equações dos experimentos 1 e 2 não foram significativos, entretanto isso não invalida a aceitação da explicação apresentada. O modelo apresenta tendência em superestimar os valores de perdas de água em todos os experimentos.

Figura 7 – Gráfico representando as equações de regressão ajustadas para as perdas de água para os experimentos 1 a 5 juntamente com a equação, valor p de probabilidade e poder explicativo ( $R^2$ ).



Fonte: Próprio autor

### 6.3 PERDAS DE SOLO

As perdas de solo só foram determinadas para os experimentos 1 e 2. Nos experimentos 3, 4 e 5 não foram determinados os valores de  $D_{50}$ , essenciais para se estimar as perdas de solo pelo modelo.

Para estimar as perdas de solo, o modelo leva em consideração, além das estimativas de perdas de água, expressas pela lâmina de escoamento superficial ( $r$ ), os tempos de início do escoamento ( $t_{ie}$ ), o tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada, expresso pelo índice  $D_{50}$ , o peso específico dos sedimentos ( $\sigma$ ), e os percentuais de cobertura do solo, residual e vegetal ( $CS$  e  $CV$ ).

#### 6.3.1 Experimento 1

Os resultados das estimativas da capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ), e a produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) estão representados na Tabela 17.

Para estimar-se a capacidade de transporte de sedimentos (Equação 47) foram considerados: o tempo transcorrido, dia, entre uma e outra aplicação dos testes de chuva simulada. O primeiro teste ocorreu no tempo zero e, os demais testes, espaçados de trinta em trinta dias; o tempo de início do escoamento ( $t_{ies}$ ); o índice  $D_{50}$  (ANEXO A) e o peso específico dos sedimentos, determinado pelas equações 40 a 46, cujo resultado estimado foi de 1,85.

A produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) é o resultado da taxa de desagregação pela chuva ( $G_{ch}$ ) e taxa de desagregação pelo escoamento ( $G_{ro}$ ). Para determinar a produção de sedimentos totais (Tabela 17), foram considerados: a intensidade das chuvas simuladas e os dados de cobertura do solo, vegetal e residual (ANEXO A).

Tabela 17 – Capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ) e produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ).

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
..... ton/ha.....					
Capacidade de transporte de sedimentos					
SSC	7,85	14,20	18,83	38,11	40,09
PCO	3,64	1,85	3,61	9,35	6,76
SDDQ	0,58	0,37	0,42	0,40	0,24
SDT	0,08	0,18	0,15	0,10	0,06
SDD	0,25	0,35	0,34	0,22	0,25
Produção de sedimentos totais					
SSC	61,13	75,44	88,85	102,56	134,38
PCO	45,95	28,83	14,11	12,13	11,99
SDDQ	23,62	14,94	7,94	8,34	6,38
SDT	12,27	8,95	5,84	2,68	2,90
SDD	15,10	10,00	4,71	3,22	3,45

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

As perdas de solo, observadas no campo e estimadas pelo modelo, estão apresentadas na Tabela 18. O modelo estima as perdas de solo, comparando a capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ) com a produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) (Tabela 17). A menor destas duas estimativas representa as perdas de solo. As perdas de solo foram limitadas pela capacidade de transporte do escoamento para todos os testes de chuva simulada em todos os tratamentos. Isto pode estar relacionado à cobertura do solo que ofereceu um obstáculo ao livre escoamento superficial de água, o que provocou diminuição na velocidade do escoamento e conseqüentemente a redução da capacidade de transporte de sedimentos, concordando com as observações de Fernando (2005), Schick et al. (2000) e Leite et al. (2004).

Tabela 18 – Perdas de solo estimadas pelo modelo e observadas no campo.

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
..... ton/ha.....					
Perdas de solo estimadas pelo modelo					
SSC	7,85	14,20	18,83	38,11	40,09
PCO	3,64	1,85	3,61	9,35	6,76
SDDQ	0,58	0,37	0,42	0,40	0,24
SDT	0,08	0,18	0,15	0,10	0,06
SDD	0,25	0,35	0,34	0,22	0,25
Perdas de solo observadas no campo					
SSC	5,47	7,97	21,00	31,15	23,54
PCO	3,08	2,96	2,50	0,25	0,26
SDDQ	0,32	0,74	1,03	0,17	0,16
SDT	0,08	0,15	0,07	0,03	0,02
SDD	0,16	0,20	0,10	0,04	0,00

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

### 6.3.2 Experimento 2

Os resultados da estimativa da capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ), e a produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ) (Tabela 19) foram determinados de forma semelhante aos descritos para o experimento 1. Para isso foram considerados os valores constantes do (ANEXO M). O peso específico dos sedimentos é o mesmo do experimento 1, que foi estimado em 1,85.

Com relação aos testes de chuva simulada, o primeiro ocorreu no tempo zero e, os demais testes, em intervalos regulares de 45 dias no cultivo do milho e de 30 dias no cultivo do feijão.

Tabela 19 – Capacidade de transporte de sedimentos ( $Y_c$ ) e produção de sedimentos totais ( $Y_s$ ).

	SSC	PCO	SDDQ	SDI	SDD	CNM
..... ton/ha .....						
Capacidade de transporte de sedimentos						
Cultivo do milho						
Teste 1	13,14	2,65	1,29	0,01	0,17	0,05
Teste 2	11,59	0,63	0,73	0,02	0,33	0,04
Teste 3	9,05	1,41	0,32	0,01	0,34	0,08
Cultivo do feijão						
Teste 1	15,37	0,24	0,22	0,03	0,13	0,05
Teste 2	12,33	0,47	1,11	0,03	0,17	0,27
Teste 3	25,20	2,15	0,51	0,02	0,19	0,14
Produção de sedimentos totais						
Cultivo do milho						
Teste 1	78,19	54,76	41,67	12,51	5,89	0,06
Teste 2	67,46	32,69	22,47	7,77	4,07	0,05
Teste 3	109,25	64,40	38,66	31,76	25,68	0,07
Cultivo do feijão						
Teste 1	62,80	43,53	36,55	2,54	1,06	0,05
Teste 2	107,78	60,08	51,47	4,68	2,46	0,01
Teste 3	154,99	51,99	41,94	3,55	2,50	0,11

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; CNM: Campo nativo melhorado. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Leite (2003)

As perdas de solo, observadas no campo e estimadas pelo modelo, estão mostradas na Tabela 20 e foram obtidos de forma semelhante a descrita para o experimento 1.

Tabela 20 – Perdas de solo estimadas pelo modelo e observadas no campo.

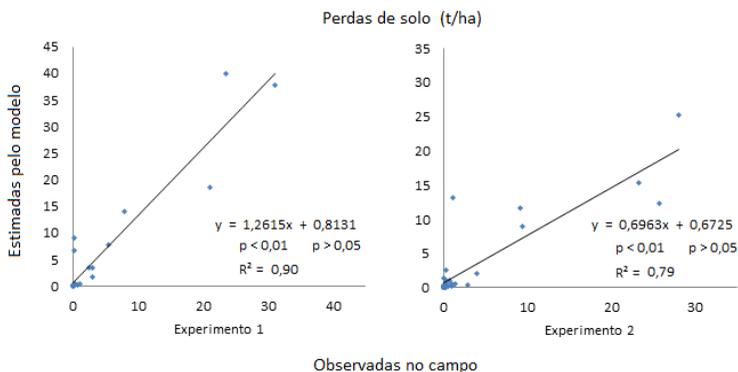
	SSC	PCO	SDDQ	SDI	SDD	CNM
..... ton/ha .....						
Perdas de solo estimadas pelo modelo						
Cultivo do milho						
Teste 1	13,14	2,65	1,29	0,01	0,17	0,05
Teste 2	11,59	0,63	0,73	0,02	0,33	0,04
Teste 3	9,05	1,41	0,32	0,01	0,34	0,07
Cultivo do feijão						
Teste 1	15,37	0,24	0,22	0,03	0,13	0,05
Teste 2	12,33	0,47	1,11	0,03	0,17	0,16
Teste 3	25,20	2,15	0,51	0,02	0,19	0,11
Perdas de solo observadas no campo						
Cultivo do milho						
Teste 1	1,08	0,25	0,08	0,04	0,01	0,03
Teste 2	9,15	1,32	0,31	0,22	0,06	0,06
Teste 3	9,38	0,06	0,05	0,03	0,01	0,01
Cultivo do feijão						
Teste 1	23,28	0,88	0,51	0,06	0,03	0,03
Teste 2	25,74	2,88	0,69	0,04	0,02	0,01
Teste 3	28,08	3,94	0,99	0,01	0,01	0,02

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; CNM: Campo nativo melhorado. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Leite (2003)

### 6.3.3 Equações de regressão e coeficiente de correlação para as perdas de solo observadas e estimadas pelo modelo

A figura 8 apresenta o coeficiente de correlação e a equação de regressão para os dados de perda de solo observados no campo e estimados pelo modelo. Analisando os gráficos pode-se observar que há correlação linear positiva entre os valores de perda de água observados e os estimados pelo modelo para os experimentos 1 e 2. Pode-se afirmar ainda que os coeficientes de inclinação das equações ajustadas foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste t. Por outro lado observa-se que os interceptos das equações não foram significativos, entretanto isso não invalida a aceitação da explicação apresentada. O modelo apresenta tendência em superestimar os valores de perdas de água em todos os experimentos.

Figura 8 – Gráfico representando as equações de regressão ajustadas para as perdas de solo para os experimentos 1 e 2 juntamente com a equação, valor p de probabilidade e poder explicativo ( $R^2$ ).



Fonte: Próprio autor

#### 6.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO

A eficiência do modelo, quanto a sua capacidade de predição de perdas de água e solo, foi avaliada segundo o coeficiente de correlação, o coeficiente de concordância (WILLMOTT, 1982) e, também, o índice do confiança (BIUDES et al., 2008). Estes valores, para as perdas de solo e água de todos os experimentos, estão sintetizados e representados na Tabela 21.

Tabela 21 – Coeficiente de correlação ( $R$ ), coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ) e índice de confiança ( $c$ ), para os dados de perda de água e solo para os experimentos 1 a 5.

Experimento		$R^2$	$R$	$d$	$C$	Desempenho
1	PA	0,82	0,91	0,91	0,82	Muito bom
	PS	0,91	0,96	0,95	0,90	Ótimo
2	PA	0,75	0,87	0,82	0,71	Bom
	PS	0,78	0,89	0,87	0,77	Muito bom
3	PA	0,78	0,88	0,57	0,51	Sofrível
	PS	-	-	-	-	-
4	PA	0,55	0,74	0,73	0,54	Sofrível
	PS	-	-	-	-	-
5	PA	0,64	0,80	0,70	0,56	Sofrível
	PS	-	-	-	-	-

PA: Perdas de Água; PS: Perdas de Solo. Fonte: Próprio autor

Analisando os valores da Tabela 21, o coeficiente de correlação  $R$ , que indica o quanto os dados de perda de solo e água estão dispersos em torno da reta de regressão, teve uma variação de 0,74 à 0,96, mostrando uma pequena dispersão dos dados, indicando que o modelo consegue explicar pelo menos 74 % da variação entre os dados de perdas de água e solo estimados e observados, para os experimentos estudados.

No entanto, em relação ao índice de concordância, e o índice de confiança, esta variação foi mais acentuada, com valores entre 0,57 e 0,95 para o índice de concordância e 0,51 e 0,90 para o índice de confiança, indicando que a exatidão ou a aproximação entre os dados estimados e os observados apresenta resultados preocupantes, principalmente para o experimento 3.

Segundo a classificação de Biudes et al., (2008), o índice de confiança obtido para o modelo, na estimativa de perdas de água, variou de sofrível a muito bom, enquanto, a estimativa de perdas de solo, a variação foi muito bom e ótimo.

Para os experimentos realizados na Área experimental I, o fato do experimento 3 ter apresentado o pior índice de confiança, 0,51, que pode ser explicado, primeiramente, em função dos objetivos do experimento 3 terem sido tão distintos daqueles do experimento que originaram os parâmetros de recomendação para a taxa de decaimento da infiltração,  $\phi$ , para a equação de Horton. A adoção do parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi = 8,71$ , para o experimento 3, pode não estar representando a taxa de decaimento da infiltração para os tratamentos que foram realizados aqui. Outra possibilidade está relacionada à rugosidade aleatória do solo. Esta foi estimada de forma qualitativa e depois transformada em quantitativa a partir das recomendações do *Agriculture Handbook Number 703* (RENARD et al., 2000). O uso dos valores recomendados, e constantes, independente dos tratamentos realizados na pendente ou em contorno, pode estar superestimando a estimativa de perdas de água, já que o modelo se mostrou bastante sensível às variações ocorridas na rugosidade aleatória do solo. O efeito da rugosidade superficial orientada na redução das perdas de água foi demonstrada por Cogo (1981) obtendo valores 5% menores na taxa de escoamento superficial, no tratamento com preparo do solo em contorno, se comparada àquela na pendente.

Os experimentos realizados na área experimental II, apresentaram índices de confiança sofrível para as perdas de água,

para ambos os experimentos 4 e 5, valores bem inferiores se comparados aos resultados obtidos para os experimentos realizados na área experimental I. Estas diferenças podem ser explicadas primeiramente em função das diferenças entre as duas classes de solos, onde os experimentos foram conduzidos. O solo da área experimental I, um Nitossolo Háptico Alumínico, é um solo mais desenvolvido, mais intemperizado e mais homogêneo. Em contrapartida, o solo da área experimental II, um Cambissolo Húmico Alumínico léptico, trata-se de um solo mais jovem, com uma variabilidade espacial bastante acentuada. Em algumas parcelas experimentais ocorria o afloramento rochoso a aproximadamente 50/60 cm da superfície, enquanto, em outras, isto não ocorria, pois o solo tinha mais de 100/120 cm de profundidade. Diferenças podem ser observadas também na textura do solo das parcelas experimentais deste experimento, em que algumas apresentam teores de argila mais elevados que outras.

Esta variabilidade espacial, foi ressaltada na condução do experimento 4, que serviu para a determinação do parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi$ , que, posteriormente, seria recomendada para o outro experimento desta área experimental. A área experimental II foi dividida em dois blocos, e cada bloco recebeu uma unidade experimental de cada tratamento. Desta forma, cada unidade experimental sofreu a ação destas características do solo e, no momento da tabulação dos dados experimentais, estes foram tratados como a média das duas unidades experimentais. Esta diferença foi refletida principalmente na determinação da taxa de infiltração estável,  $f_c$ , que, posteriormente, influenciou a determinação da lâmina total infiltrada, a partir da equação 15.

Outro fator que contribuiu para melhores resultados nos experimentos da área experimental I, nas estimativas do modelo, tanto nas perdas de água, quanto de solo, foram os fatores relativos à precipitação. Na condução do experimento 1, na véspera de cada teste de chuva simulada, foi realizada uma chuva, denominada chuva de umedecimento, que corrigiu a umidade do solo, tornando as parcelas experimentais mais homogêneas. Assim, a série de “*delays*” anteriores ao início do escoamento superficial, relacionados ao tempo de empoçamento, tempo de armazenamento e tempo de concentração, tiveram uma variabilidade menor e, conseqüentemente, influenciaram menos na estimativa de perdas de água determinadas pelo modelo.

As diferenças encontradas entre os experimentos realizados nas áreas experimentais I e II podem, no entanto, estar demonstrando que o modelo é sensível a estas variações, demonstrando, não uma fraqueza do modelo, mas, uma qualidade do mesmo.

## 7 CONCLUSÕES

- 1) O modelo de Hartley (1987) modificado permite calcular as perdas de solo e água para eventos individuais envolvendo dados obtidos em experimentos de chuva simulada.
- 2) O modelo de Hartley (1987) modificado permite calcular as perdas de água levando em consideração os seguintes dados de entrada obtidos no campo: intensidade e duração das chuvas simuladas, rugosidade aleatória do solo, declividade das parcelas experimentais, cobertura do solo (residual e vegetal), taxa de infiltração estável e infiltração tempo a tempo.
- 3) O modelo de Hartley (1987) modificado permite calcular as perdas de solo levando em consideração os seguintes dados de entrada obtidos no campo: escoamento superficial, tempo transcorrido entre as aplicações dos testes de chuva simulada, índice dos sedimentos  $D_{50}$ , peso específico dos sedimentos, intensidade da chuva, cobertura do solo (residual e vegetal), características da parcela experimental (comprimento e declividade) e granulometria do solo.
- 4) O modelo de Hartley (1987) modificado estima as perdas de solo tão bem quanto as perdas de água nos experimentos realizados no Nitossolo Háplico Alumínico.
- 5) O modelo de Hartley (1987) modificado é um melhor estimador para as perdas de água obtidas nos experimentos desenvolvidos no Nitossolo Háplico Alumínico do que nos experimentos realizados no Cambissolo Húmico Alumínico léptico.
- 6) O modelo de Hartley (1987) modificado pode ser usado como estimador das perdas de solo e água no Nitossolo Háplico Alumínico.
- 7) A estimativa das perdas de solo pelo modelo de Hartley (1987) modificado mostra ser bastante sensível a variação provocada no parâmetro de resistência hidráulica.
- 8) A variação na estimativa de perdas de solo pelo modelo de Hartley (1987) modificado mostra-se mais sensível à variação dos parâmetros de entrada do modelo do que a estimativa nas perdas de água.

- 9) O modelo de Hartley (1987) modificado consegue estimar as perdas de solo e água para os diferentes sistemas de cultivo e manejo nos dois solos estudados.

## **8 RECOMENDAÇÕES**

- 1) Estudar mais profundamente a base conceitual do modelo de Hartley (1987) que permita a incorporação/modificação de rotinas no modelo.
- 2) Conduzir experimentos com o objetivo específico de calibrar o modelo de Hartley (1987), para observar até que ponto ele é bom para fazer previsões mais gerais.
- 3) Desenvolver mais estudos na área de modelagem de erosão hídrica pluvial, expandindo a aplicabilidade dos modelos em geral.
- 4) Incluir nos próximos estudos o fator de erodibilidade dos solos em substituição ao nomograma para o fator de erodibilidade do solo proposto por Wischmeier & Smith (1978).

## 9 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. L. et al. Crescimento inicial de milho e sua relação com o rendimento de grãos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 189-194, mar./abr. 2003.
- ALONSO, C. V. et al. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 5, p. 1211-1220, 1981.
- BARBOSA, F. T. **Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em diferentes tipos e doses de resíduo em duas direções de semeadura direta**. 2011. 100 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2011.
- BEASLEY, D. B. et al. Answers: A model for watershed planning. **Transactions of de ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 4, p. 938-944, 1980.
- BENEZ, M.C. (Coord.) **Dados e informações biofísicas da Unidade de Planejamento Regional Planalto Sul Catarinense**. Florianópolis, SC: EPAGRI, 2002. 76p.
- BERTOL, I. et al. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages/SC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 455-464, 2002.
- BERTOL, I. et al. 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**, Viçosa, MG, v. 30, p. 543-553, 2006.
- BERTOL, I. et al. Razão de perdas de solo e fator C para as culturas de soja e trigo em três sistemas de preparo em um cambissolo húmico aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 451-461, 2001.
- BERTOL, I. et al. Water erosion in no-tillage monoculture and intercropped systems along contour lines. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, p. 521-528, 2013.

BERTOL, I. et al. Taxa de decomposição do resíduo de milho e parâmetros relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2003.

BIUDES, M. S. et al. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de Bowen e Penman-Monteith. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 71-86, 2008.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 127-134, 1996.

BRAIDA, J. A.; CASSOL E. A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 711-721, 1999.

BRAIDA, J. A. **Relações da erosão entressulcos com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em um solo podzólico vermelho escuro**. 1994. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2006. 120p.

BRAVO, J. M. et al. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007.

COGO, N. P. **Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters**. 1981, 346 f, Tese (Doutorado). West Lafayette-Indiana: Purdue University, 1981, 346p.

COGO, N. P. Uma contribuição a metodologia de estudo das perdas de solo por erosão em condições de chuva natural: I - sugestões gerais, medição de volume, amostragem e quantificação de solo e água da enxurrada. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978a, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 1978a. p. 75-97.

COGO, N. P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de solo por erosão em condições de chuva natural: II - Alguns conceitos básicos e modelos de uma ficha para registro das características da chuva e perdas de solo e água. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978b, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 1978b. p. 99-107.

COMISSÃO. **Recomendação de adubação e calagem para os estados do RS e SC.** Comissão de Fertilidade do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Núcleo Regional Sul, Passo Fundo - RS, CFS/RS-SC, 1995, 233p.

DA PAIXÃO, F. J. R. et al. Ajuste da curva de infiltração por meio de diferentes modelos empíricos. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 107-112, jan./abr. 2009.

DAVID, W. P.; BEER, C. E. Simulation of soil erosion: I. Development of a Mathematical Erosion Model. II. Streamflow and Suspended Sediment Simulation Results. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 126-133, 1975.

DULEY, F. L. Surface factors effecting the rate of intake of water by soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 4, p. 60-64, 1940.

EHLERS, W. Transpiration efficiency of oat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 5, p. 810-817, 1989.

EKERN, R. C. Raindrop impact as a force initiating soil erosion. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 15, p. 7-10, 1951.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies: Part I. **Agricultural Engineering**, v. 28, p. 145-146, 1947.

EMBRAPA. Recomendações gerais do encontro sobre o uso de simulador em pesquisa de conservação do solo no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISAS DE EROSÃO COM SIMULADOR DE CHUVA, 1., 1975, Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA, 1975. p. 107-120.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2006, 412p.

ENGEL, F. L. **Erosão hídrica provocada por chuvas simuladas durante o cultivo da soja**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC, 2005.

EVANS, R. Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. In. KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C.. **Soil Erosion**. Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 1980, p. 109-128.

FOSTER, G. R. et al. An erosion equation derived from basic erosion principles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 678-682, 1977.

FOSTER, G. R. et al. Processes of soil erosion by water: soil erosion and crop productivity. In. FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. **Soil erosion and crop productivity**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1985. p. 137-162.

FOSTER, G. R.; WISCHMEIER, W. H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 305-309, 1974.

FOSTER, G. R. Modelling the erosion process. In: HANN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L.. **Hydrology modelling of small watersheds**. St Joseph - Michigan, Am. Soc. Agr. Eng., an ASAE, Monograph, n. 5, 1982. p. 296-380.

FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; NEIBLING, W. H. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 133-146, 1985.

GILLEY, J. E. et al. Interrill soil erosion. Part I: Development of Model Equations. Part II: Testing and Use of Model Equation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 147-159, 1985.

HARTLEY, D. M. Simplified process model for water sediment yield from single storms. Part I: Model Formulation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 710-717, 1987.

HEIFFIG, L. S. et al. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1981. 324p.

HUGGINS, L. F. **Conceptual runoff model**. jan. section 2, 1979.

KAMPHORST, E. C. et al. Predicting depression storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1749-1758, 2000.

KILINC, M.; RICHARDSON, E. V. Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. **Hydrology Papers**, Colorado State University, Fort Collins, v. 63, 1973, 53p.

KIRKBY, M. J. **Modelling water erosion processes**: Soil erosion. [s.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 1980.

KUNS, J. H. et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, nov. 2007.

LAWS, J. O. Recent studies in raindrops and erosion. **Agricultural Engineering**, v. 21, p. 431-433, 1940.

LEITE, D. **Erosão hídrica sob chuva simulada em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes manejos.** 2003. 126f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2003.

LEITE, D. et al. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de Água e Solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 1033-1044, 2004.

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

LUCIANO, R. V. **Erosão hídrica em três formas de semeadura de aveia e ervilhaca em um Cambissolo Húmico.** 2008. 68f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2008.

MARIOTI, J. **Erosão hídrica em cambissolo húmico cultivado com milho e soja sem preparo do solo, nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivado.** 2012. 74f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2012.

MELLO, E. L. **Erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo sob chuva simulada.** 2002. 88f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2002.

MELLO, E. L. **Modelo de suporte à avaliação do impacto do uso e manejo do solo no balanço hídrico e nas perdas de solo.** 2009. 76f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

MEYER, L. D. Symposium on simulation of rainfall for soil erosion research. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 63-65, 1965.

MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 754-762, 1969.

MITCHELL, J. K.; BUBENZER, G. D. Estimación de la perda del suelo. In. KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C.. **Soil Erosion**. Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 1980, p. 35-88.

MOLDENHAUER, W. C.; KOSWARA, J. Effect of initial clod on characteristics of splash and wash erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 6, p. 875-879, 1968.

MUTCHLER, C. K.; YOUNG, R. A. Soil detachment by raindrops. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources**. Washington, USDA - Agricultural Research Service, ARS-S-40, p. 113-117, 1975.

ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 3, p. 729-732, 1984.

PARTHENIADES, E. Erosion and deposition of cohesive soils. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, p. 105-139, 1965

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

RAWLS, W. J. et al. Infiltration. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Hydrology Handbook**, v. 28, 2. ed., New York, p. 75-124, 1996.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 81, p. 1316-1328, 1982.

RENARD, K. G. et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation - RUSLE: **Agriculture Handbook**, n. 703, U. S. Department of Agriculture, 2000, 404p.

RENARD, K. G. et al. The revised universal soil loss equation. In. LAL, R. **Soil Erosion Research Methods**. Soil and Water Conservation Society, 2. ed., p. 105-126, 1985.

ROSE, C. W. **Development in soil erosion and deposition models:** Advanced in soil science. New York: Springer, Verlag, 1985, v. 2.

ROSE, C. W. et al. A Mathematical model of soil erosion and deposition process: I. Theory for a Plane Land Element. II. Application to Data from an Arid-zone Catchment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 991-1000, Jan. 1983.

SCHICK, J. et al. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I - Perdas de Solo e Água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 427-436, 2000.

SILVA, D. et al. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um argissolo vermelho-amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 409-419, maio/ago. 2005.

SLONEKER, L. L.; MOLDENHAUER, W. C. Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. **Journal of Soil and Water Conservation**, p. 231-236, Sept./Oct. 1977.

SMITH, D. D. Interpretation of soil conservation data for field use. **Agricultural Engineering**, v. 22, p. 173-175, 1941.

SMITH, R. E. A kinematic model for surface mine sediment yield. **Transactions of de ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 6, p. 1508-1514, 1981.

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

SOIL SURVEY STAFF. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. **Agriculture Handbook**, n. 436, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2. ed., Washington, 1999, 870p.

STOCKING, M. **Modelagem de perdas de solo**: sugestões para uma aproximação brasileira, Brasília: Secretaria de recursos naturais, 1982, 92p.

TUCCI, C. E. M. (Org) **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre, UFRGS, 1993, v. 1, 943p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, UFRGS, 2005, 678p.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p. 497-506, mar. 2000.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, Newark, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, nov. 1982.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Soil and water management and conservation: relation of soil properties to its erodibility. Division S-6. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, p. 131-136, 1969.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. **Agriculture Handbook**, n. 537, Washington, U. S. Department of Agriculture, 1978, 58p.

WISLER, C. O.; BRATER, E. F. **Hidrologia**. Rio de Janeiro, 2. ed., Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1964, 484p.

## ANEXOS

ANEXO A - Intensidade real das chuvas simuladas; declividade média das parcelas; rugosidade aleatória; cobertura do solo, residual e vegetal; taxa constante de enxurrada; taxa de infiltração estável; tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada, expresso pelo índice  $D_{50}$ ; tempo de início da enxurrada e parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton, nos cinco testes de chuvas simuladas aplicadas, durante o cultivo da soja.

	SSC	PCO	SDDQ	SDT	SDD
	Intensidade/Quantidade real das chuvas observadas				
Teste 1	64,11	66,00	66,40	65,67	66,32
Teste 2	65,36	67,77	66,91	67,12	64,70
Teste 3	65,07	63,49	64,42	65,44	63,86
Teste 4	64,14	64,80	65,45	66,57	63,68
Teste 5	63,02	66,85	63,40	65,63	65,45
	Rugosidade aleatória da superfície do solo (cm)				
Teste 1	3,37	3,37	0,85	0,85	0,85
Teste 2	1,37	1,91	0,85	0,85	0,85
Teste 3	1,91	1,91	0,85	0,85	0,85
Teste 4	1,34	1,34	0,85	0,85	0,85
Teste 5	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
	Declividade média das parcelas experimentais ( $\text{mm}^{-1}$ )				
	0,15	0,12	0,21	0,14	0,22
	Cobertura do solo por resíduos de nabo forrageiro ( $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ )				
Teste 1	0,00	0,06	0,50	0,74	0,68
Teste 2	0,00	0,06	0,49	0,72	0,65
Teste 3	0,00	0,05	0,44	0,68	0,62
Teste 4	0,00	0,03	0,38	0,64	0,57
Teste 5	0,00	0,03	0,37	0,62	0,55
	Cobertura do solo pela copa das plantas ( $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ )				
Teste 1	0,00	0,07	0,06	0,06	0,06
Teste 2	0,00	0,53	0,52	0,46	0,50
Teste 3	0,00	0,88	0,83	0,73	0,87
Teste 4	0,00	1,00	0,85	1,00	1,00
Teste 5	0,00	1,00	0,93	1,00	1,00

Continua

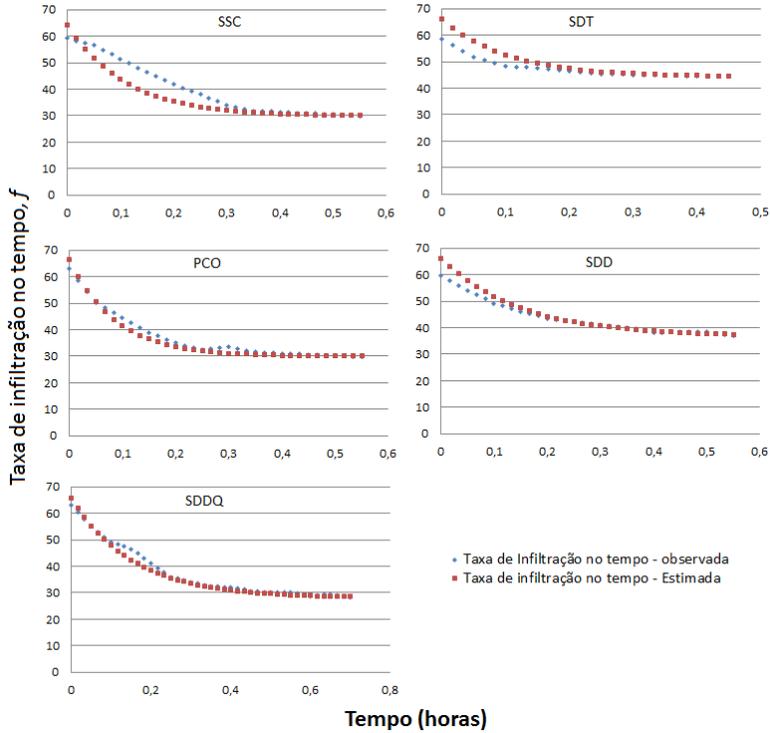
SSC: solo sem cultivo; SDT: semeadura direta tradicional; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: (ENGEL, 2005).

ANEXO A - Intensidade real das chuvas simuladas; declividade média das parcelas; rugosidade aleatória; cobertura do solo, residual e vegetal; taxa constante de enxurrada; taxa de infiltração estável; tamanho dos sedimentos transportados pela enxurrada, expresso pelo índice  $D_{50}$ ; tempo de início da enxurrada e parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton, nos cinco testes de chuvas simuladas aplicadas, durante o cultivo da soja.

	SSC	PCO	SDDQ	SDT	SDD
Conclusão					
	Taxa constante de Enxurrada ( $\text{mm h}^{-1}$ )				
Teste 1	33	36	35	21	28
Teste 2	39	36	37	31	34
Teste 3	43	33	30	25	30
Teste 4	42	30	26	19	23
Teste 5	44	29	18	13	21
	Taxa de infiltração estável, $f_c$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )				
Teste 1	29,80	29,95	28,10	44,30	36,80
Teste 2	25,70	29,60	27,80	34,10	28,50
Teste 3	20,80	30,95	34,25	36,50	31,78
Teste 4	22,14	33,83	38,23	45,34	38,52
Teste 5	16,10	22,47	47,39	53,85	43,37
	Índice $D_{50}$ (mm)				
Teste 1	0,9	0,5	0,3	0,3	0,3
Teste 2	1,0	0,8	0,5	0,2	0,3
Teste 3	1,1	0,6	0,4	0,2	0,3
Teste 4	0,9	0,5	0,5	0,2	0,4
Teste 5	1,1	0,6	0,4	0,1	0,3
	Tempo de início da enxurrada (minutos)				
Teste 1	19,5	26	18	33	24,5
Teste 2	13,5	13,5	15	24	19
Teste 3	15	24	21	30	24
Teste 4	18	24	27	33	27
Teste 5	9	22,5	27	33	31,5

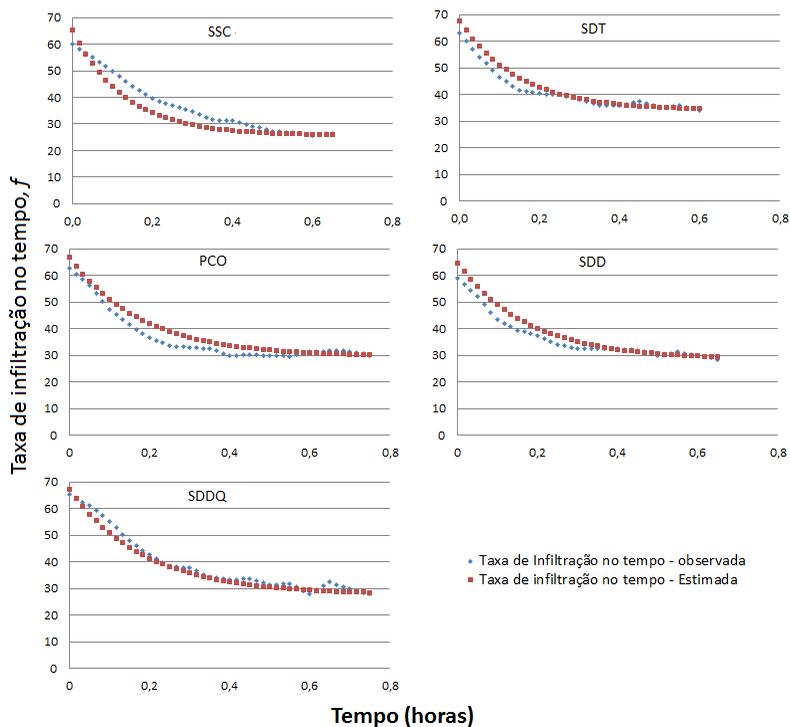
SSC: solo sem cultivo; SDT: semeadura direta tradicional; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: (ENGEL, 2005).

ANEXO B - Taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada Pelo modelo de Horton. Experimento 1: primeiro teste de chuva simulada.



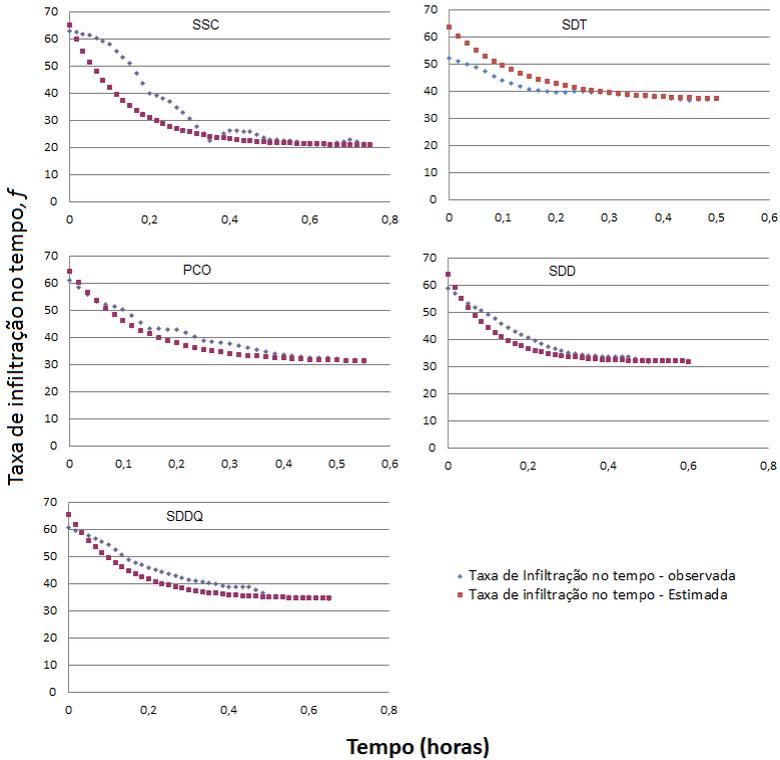
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: sementeira direta sobre resíduos queimados; SDT: sementeira direta tradicional; SDD: sementeira direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO C - Taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada pelo modelo de Horton. Experimento 1: segundo teste de chuva simulada.



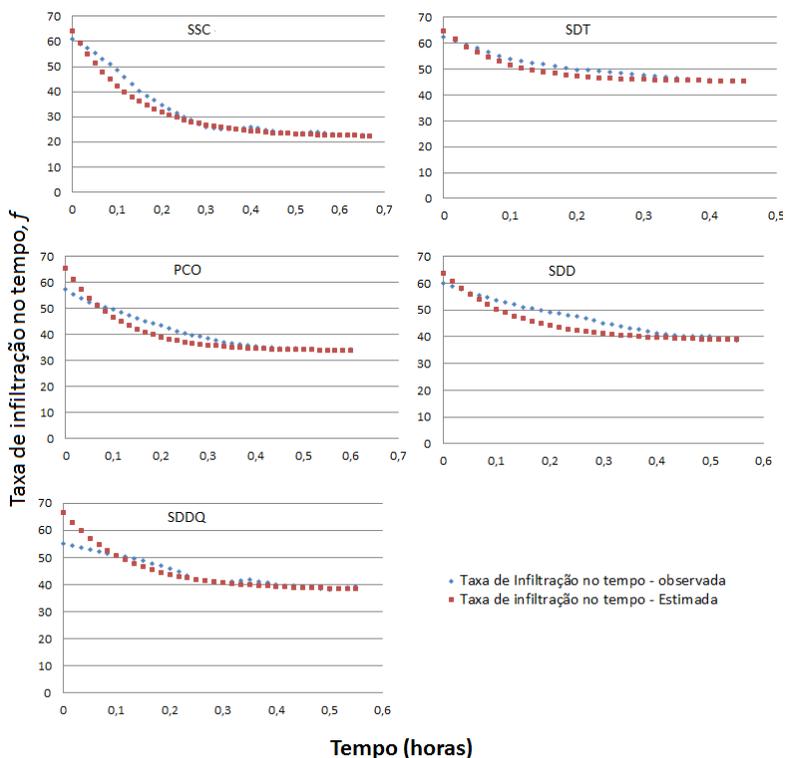
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO D - Taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada pelo modelo de Horton. Experimento 1: terceiro teste de chuva simulada.



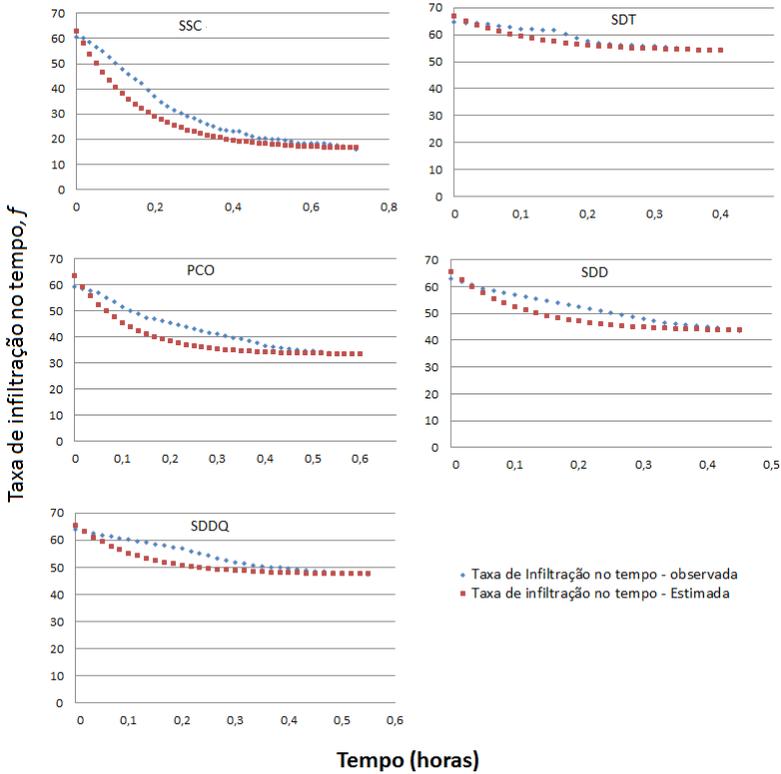
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO E - Taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada pelo modelo de Horton. Experimento 1: quarto teste de chuva simulada.



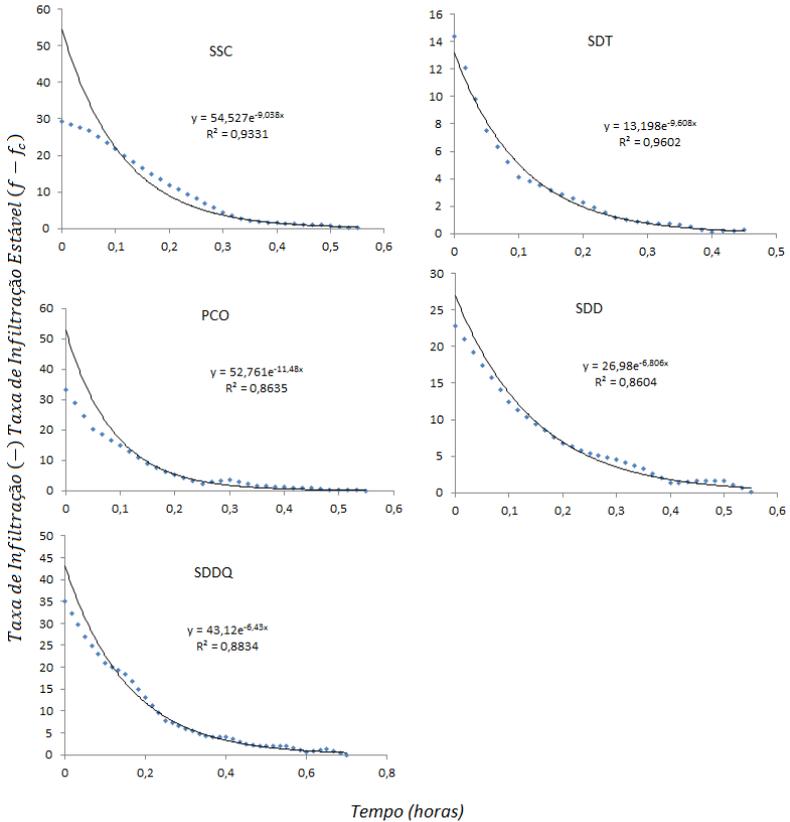
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO F - Taxa de infiltração no tempo  $t$ , observada no campo e estimada pelo modelo de Horton. Experimento 1: quinto teste de chuva simulada.



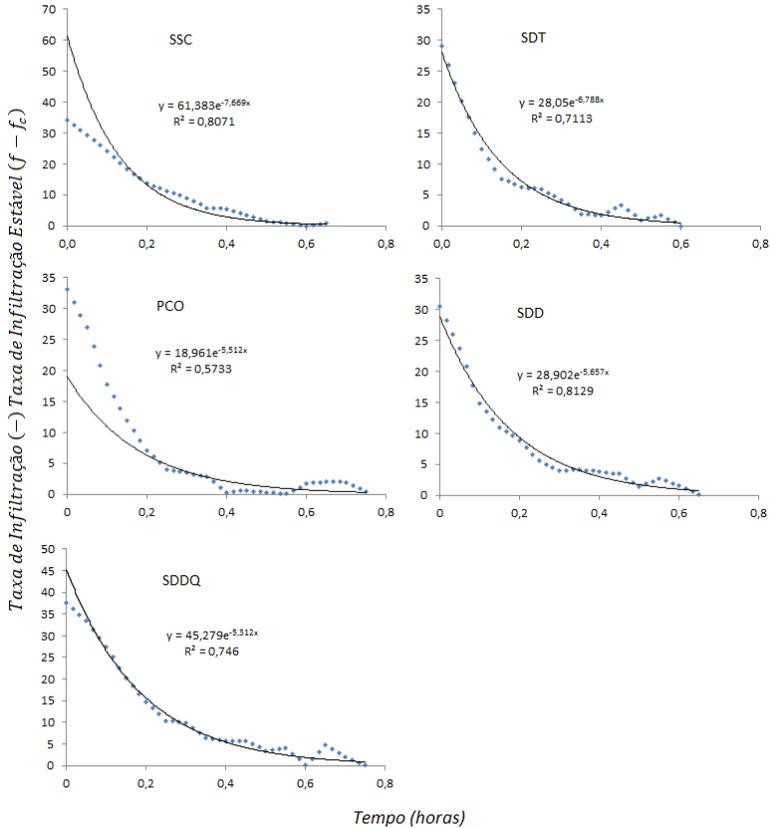
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO G - Gráfico de  $(f - f_c) \times t$ . Experimento 1, primeiro teste de chuva simulada.  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável.



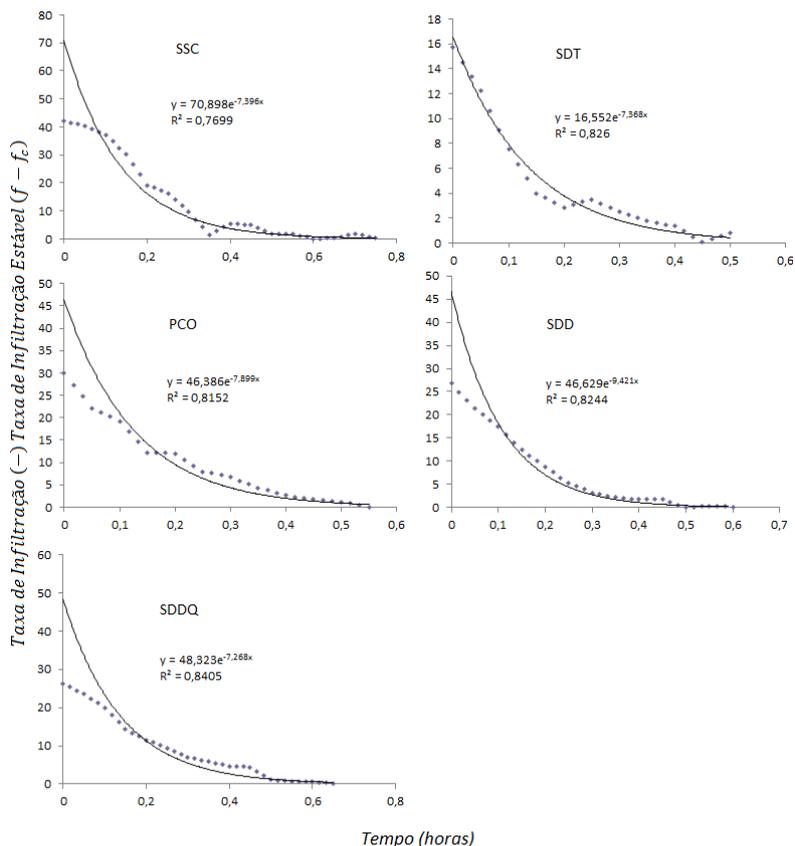
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO H - Gráfico de  $(f - f_c) \times t$ . Experimento 1, segundo teste de chuva simulada.  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável.



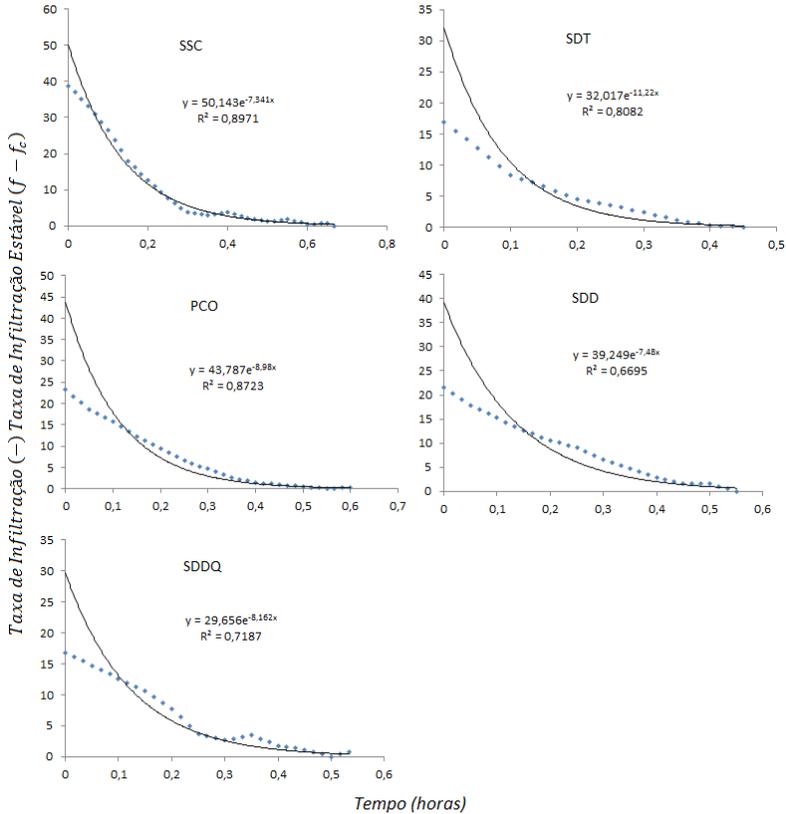
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO I - Gráfico de  $(f - f_c) \times t$ . Experimento 1, terceiro teste de chuva simulada.  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável.



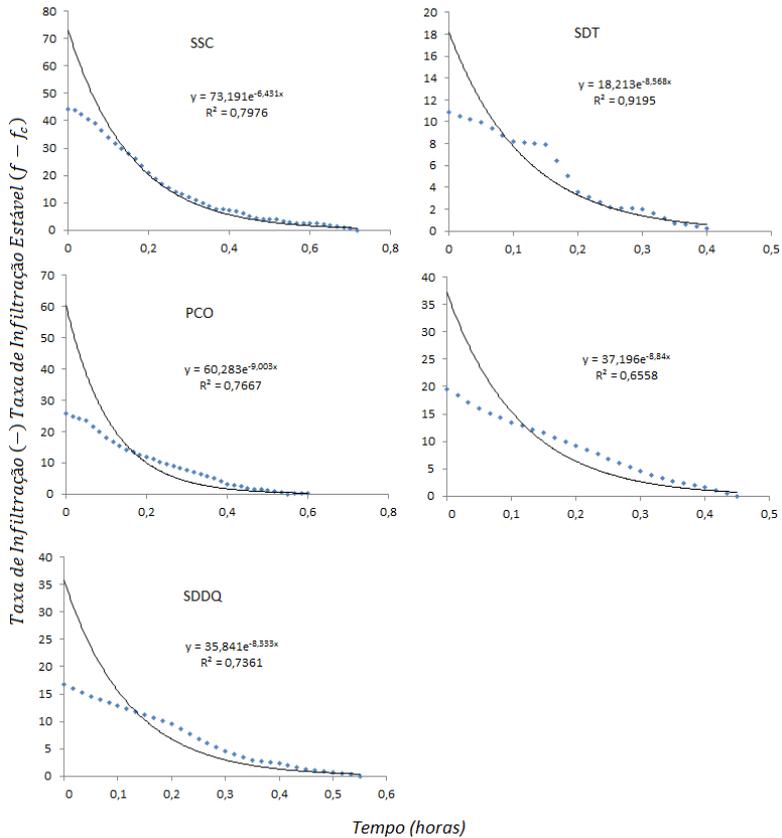
SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO J – Gráficos de  $(f - f_c) \times t$ . Experimento 1, quarto teste de chuva simulada.  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável.



SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO K – Gráficos de  $(f - f_c) \times t$ . Experimento 1, quinto teste de chuva simulada.  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável.



SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO L – Parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi$ , da equação de Horton (1940). Com base nos anexos 13 à 17, nos diferentes sistemas de preparo do solo e chuvas simuladas aplicadas. Ajustados pelos gráficos de  $(f - f_c) \times t$ . Valores médios recomendados para os experimentos 1, 2 e 3.

Tratamento	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média
SSC	9,04	7,67	7,40	7,34	6,43	7,58
PCO	11,48	5,51	7,90	8,98	9,00	8,57
SDDQ	6,43	5,31	7,27	8,16	8,33	7,10
SDT	9,61	6,79	7,37	11,22	8,57	8,71
SDD	6,81	5,66	9,42	7,48	8,84	7,64

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDT: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Engel (2005)

ANEXO M – Intensidade de chuvas observadas; Quantidade de chuvas observadas; Declividade média das parcelas experimentais; Rugosidade aleatória da superfície do solo e cobertura do solo residual; vegetal; parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton; taxa de infiltração estável; tamanho dos sedimentos transportados pelo escoamento, expresso pelo índice  $D_{50}$  e tempo de início do escoamento superficial, em cada tratamento, no cultivo do milho e do feijão, nos testes de chuva simulada.

Cultivo	SSC	PCO	SDDQ	SDI	SDD	CNM	
Intensidade de chuvas observadas ( $\text{mm h}^{-1}$ )							
Teste 1	61,3	54,2	63,9	56,8	58,0	76,4	
Teste 2	Milho	63,1	66,2	68,9	59,1	64,6	72,6
Teste 3		72,6	80,2	69,4	71,4	63,8	79,3
Teste 1		58,8	65,3	63,4	66,9	63,9	62,0
Teste 2	Feijão	61,4	64,9	64,7	66,9	62,4	81,0
Teste 3		66,6	74,1	66,2	72,0	74,9	68,2
Quantidade real chuvas observadas ( $\text{mm h}^{-1}$ )							
Teste 1	82,8	82,2	86,3	85,2	78,4	103,2	
Teste 2	Milho	63,1	79,5	68,9	69,9	67,9	72,6
Teste 3		90,8	141,7	104,1	160,7	144,6	100,5
Teste 1		60,8	65,3	63,4	66,9	63,9	59,9
Teste 2	Feijão	92,2	96,3	96,0	100,4	94,6	122,9
Teste 3		99,9	111,1	99,3	108,1	112,3	102,3
Declividade média das parcelas experimentais ( $\text{m m}^{-1}$ )							
	0,15	0,12	0,21	0,14	0,22	0,15	
Rugosidade aleatória da superfície do solo (cm)							
Teste 1	3,37	3,37	0,85	0,85	0,85	0,85	
Teste 2	Milho	1,91	1,91	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 3		1,91	1,91	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 1		3,37	3,37	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 2	Feijão	1,91	1,91	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 3		1,91	1,91	0,85	0,85	0,85	0,85
Cobertura do solo por resíduos culturais ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ )							
Teste 1	0,00	0,10	0,36	0,80	0,90	1,00	
Teste 2	Milho	0,00	0,06	0,34	0,75	0,86	1,00
Teste 3		0,00	0,00	0,19	0,55	0,57	1,00
Teste 1		0,00	0,13	0,24	0,95	0,98	1,00
Teste 2	Faijão	0,00	0,10	0,22	0,93	0,96	1,00
Teste 3		0,00	0,05	0,19	0,90	0,94	1,00

Continua

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos dessecados; CNM: Campo nativo melhorado. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Leite (2003).

ANEXO M – Intensidade de chuvas observadas; Quantidade de chuvas observadas; Declividade média das parcelas experimentais; Rugosidade aleatória da superfície do solo e cobertura do solo residual; vegetal; parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton; taxa de infiltração estável; tamanho dos sedimentos transportados pelo escoamento, expresso pelo índice  $D_{50}$  e tempo de início do escoamento superficial, em cada tratamento, no cultivo do milho e do feijão, nos testes de chuva simulada.

Cultivo	SSC	PCO	SDDQ	SDI	SDD	CNM	
Conclusão							
Cobertura do solo pela copa das plantas ( $m^2 m^{-2}$ )							
Teste 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	
Teste 2	Milho	0,00	0,63	0,51	0,56	0,64	1,00
Teste 3		0,00	0,51	0,44	0,47	0,51	1,00
Teste 1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Teste 2	Feijão	0,00	0,10	0,09	0,16	0,18	1,00
Teste 3		0,00	0,51	0,41	0,67	0,64	1,00
Parâmetro de decaimento da taxa de infiltração, $\varphi$ , Valores médios recomendados							
		7,58	8,57	7,10	8,71	7,64	7,64
Taxa de infiltração estável, $f_c$ ( $mm h^{-1}$ )							
Teste 1		32	35	34	52	33	56
Teste 2	Milho	35	42	25	49	22	50
Teste 3		47	76	57	69	52	56
Teste 1		17	19	30	50	31	35
Teste 2	Feijão	24	33	33	54	39	36
Teste 3		13	35	31	63	50	35
Índice $D_{50}$ (mm)							
Teste 1		0,783	0,170	0,157	0,162	0,037	0,043
Teste 2	Milho	0,892	1,179	0,507	0,084	0,037	0,037
Teste 3		1,527	0,730	0,716	0,123	0,069	0,048
Teste 1		0,819	1,705	1,228	0,161	0,202	0,132
Teste 2	Feijão	1,362	1,516	0,678	0,163	0,107	0,037
Teste 3		1,450	1,262	1,356	0,049	0,166	0,164
Tempos de início do escoamento superficial (minutos)							
Teste 1		33	33	11	62	17	23
Teste 2	Milho	19	26	08	36	08	11
Teste 3		36	60	47	95	78	41
Teste 1		26	23	14	35	15	14
Teste 2	Feijão	29	36	28	47	35	21
Teste 3		22	33	32	53	32	25

SSC: solo sem cultivo; PCO: preparo convencional; SDDQ: semeadura direta sobre resíduos queimados; SDI: semeadura direta tradicional; SDD: semeadura direta sobre resíduos desseccados; CNM: Campo nativo melhorado. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Leite (2003).

ANEXO N – Intensidade observada de chuva,  $i$  ; Volume de chuva,  $V$ ; Cobertura do solo,  $CS$ ; Taxa constante de enxurrada,  $T_{ec}$ ; declividade média das parcelas; rugosidade aleatória,  $RR$  e parâmetro de decaimento da taxa da infiltração da equação de Horton,  $\phi$  nos diferentes tratamentos estudados.

Tratamen to	$i$ (mm h <sup>-1</sup> )	$V$ (mm)	$CS$ (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	$T_{ec}$	Declividade	$RR$	$\phi$
Experimento A: Resíduo do Milho							
C-M <sub>1/1</sub>	69	104	0,92	39 ± 2,3	14,5	1,34	8,71
C-M <sub>1/2</sub>	67	101	0,73	34 ± 0,3	14,6	1,34	8,71
P-M <sub>1/1</sub>	69	104	0,92	42 ± 2,8	14,3	1,34	8,71
P-M <sub>1/2</sub>	67	101	0,72	35 ± 2,0	14,3	1,34	8,71
Experimento B: Resíduo do Trigo							
C-T <sub>1/1</sub>	71	107	0,68	28 ± 7,2	14,5	1,34	8,71
C-T <sub>1/2</sub>	67	101	0,51	32 ± 6,6	14,6	1,34	8,71
P-T <sub>1/1</sub>	69	104	0,67	32 ± 1,3	14,3	1,34	8,71
P-T <sub>1/2</sub>	65	98	0,55	34 ± 0,3	14,3	1,34	8,71
Experimento C: Resíduo da Soja							
C-S <sub>1/1</sub>	70	105	0,79	35 ± 2,5	14,5	1,34	8,71
C-S <sub>1/2</sub>	69	104	0,65	36 ± 2,1	14,6	1,34	8,71
P-S <sub>1/1</sub>	68	102	0,80	35 ± 2,8	14,3	1,34	8,71
P-S <sub>1/2</sub>	67	101	0,65	35 ± 2,7	14,3	1,34	8,71

C-Semeadura em contorno ao declive; P-Semeadura no sentido da pendente; M-Resíduo de milho; T-Resíduo de trigo; S-Resíduo de soja; <sub>1/1</sub>-Dose de resíduo de 100% do total produzido; <sub>1/2</sub>-Dose de resíduo de 50% do total produzido. (Média das repetições). Fonte: Adaptada de Barbosa (2011)

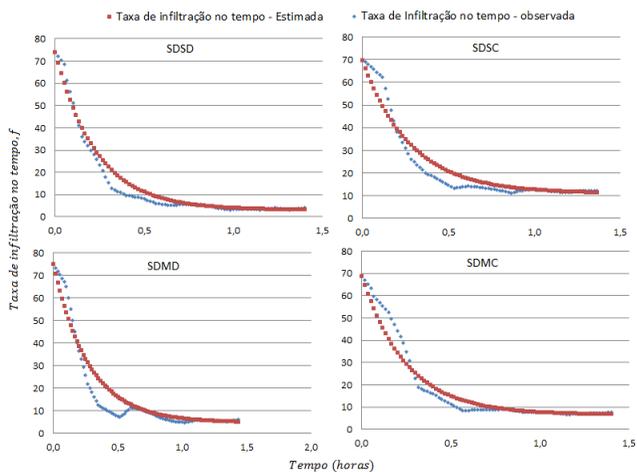
ANEXO O – Intensidade de chuvas observadas; Quantidade de chuvas observadas; Declividade média das parcelas experimentais; Rugosidade aleatória da superfície do solo e cobertura do solo residual e vegetal e parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton, em cada tratamento, no cultivo do milho e da soja, nos testes de chuva simulada.

Tratamentos	SDSD	SDSC	SDMD	SDMD
	Intensidade de chuvas observadas (mm h <sup>-1</sup> )			
Teste 1	74,08	69,68	75,01	68,75
Teste 2	65,45	65,50	64,03	65,92
Teste 3	64,14	66,55	64,14	66,55
Teste 4	65,44	63,30	62,84	65,91
	Quantidade real chuvas observadas (mm h <sup>-1</sup> )			
Teste 1	111,12	104,51	112,52	103,12
Teste 2	96,68	98,25	96,05	98,88
Teste 3	96,20	99,83	96,20	99,83
Teste 4	98,16	94,95	94,25	98,86
	Rugosidade aleatória da superfície do solo (cm)			
Teste 1	1,91	1,91	1,91	1,91
Teste 2	1,91	1,91	1,91	1,91
Teste 3	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 4	0,85	0,85	0,85	0,85
	Declividade média das parcelas experimentais (m m <sup>-1</sup> )			
	13,80	13,30	13,50	13,40
	Cobertura do solo por resíduos culturais (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )			
Teste 1	0,72	0,69	0,80	0,79
Teste 2	0,63	0,65	0,73	0,69
Teste 3	0,53	0,61	0,69	0,66
Teste 4	0,63	0,76	0,66	0,69
	Cobertura do solo pela copa das plantas (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )			
Teste 1	0,07	0,08	0,29	0,38
Teste 2	0,36	0,50	0,80	0,79
Teste 3	0,49	0,52	0,86	0,80
Teste 4	0,24	0,28	0,55	0,48
	Taxa de infiltração estável, $f_c$ (mm h <sup>-1</sup> )			
Teste 1	3,15	11,12	4,90	6,70
Teste 2	2,13	2,10	2,33	7,34
Teste 3	5,17	13,80	2,95	19,93
Teste 4	1,51	7,20	1,90	9,50
	Parâmetro de decaimento da taxa de infiltração, $\phi$ , da equação de Horton. Valores médios recomendados			
	5,77	4,29	5,84	5,23

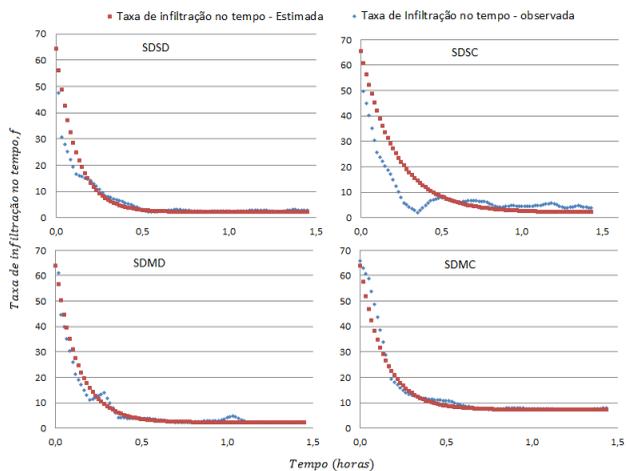
SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

## ANEXO P – Taxa de infiltração no tempo $t$ , observada no campo e estimada pelo modelo de Horton para o experimento 4.

### Primeiro teste de chuva simulada.



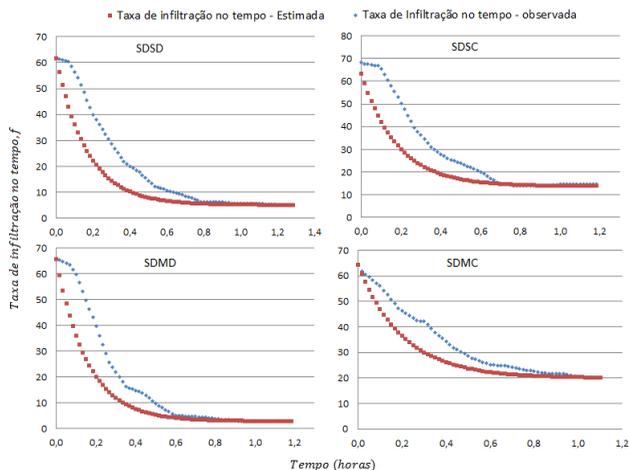
### Segundo teste de chuva simulada.



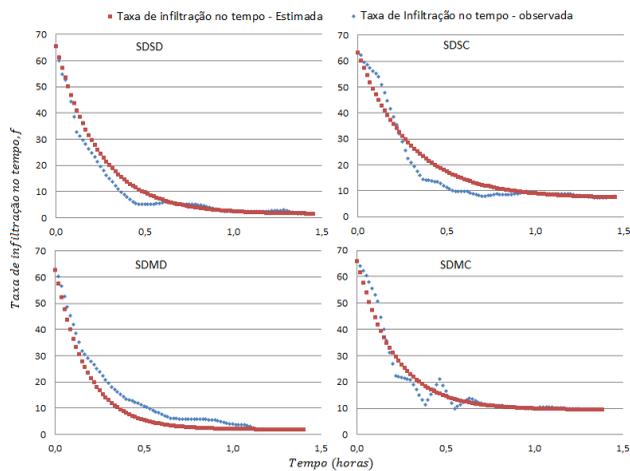
SDSD: sementeira direta de soja em declive; SDSC: sementeira direta de soja em contorno; SDMD: sementeira direta de milho em declive; SDMC: sementeira direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

## ANEXO Q – Taxa de infiltração no tempo $t$ , observada no campo e estimada Pelo modelo de Horton para o experimento 4:

### Terceiro teste de chuva simulada.



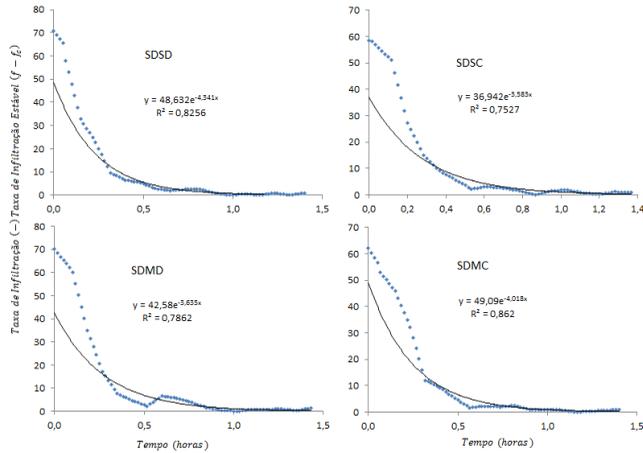
### Quarto teste de chuva simulada.



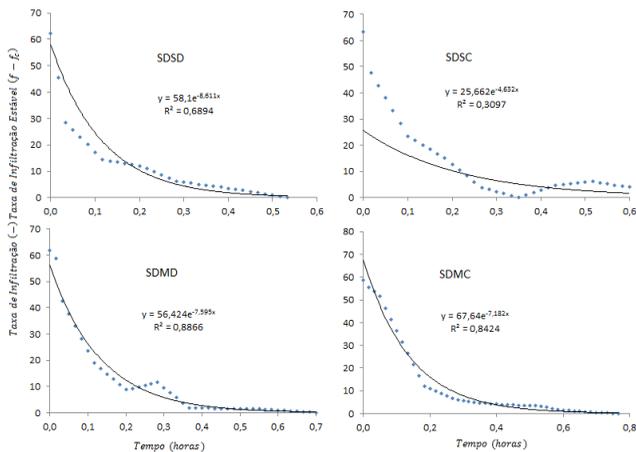
SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

ANEXO R – Gráficos de  $(f - f_c) \times t$ .  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável para o experimento 4.

Primeiro teste de chuva simulada.



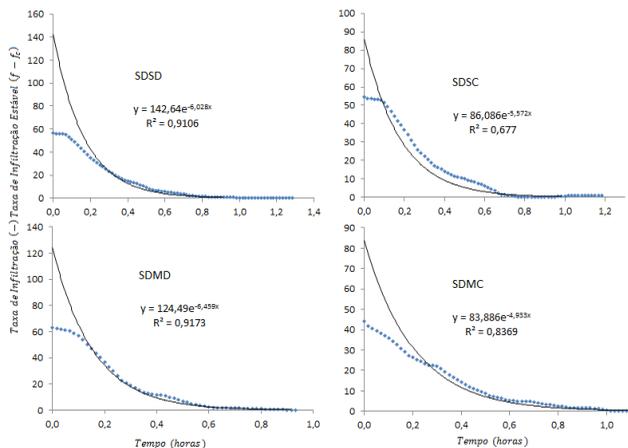
Segundo teste de chuva simulada.



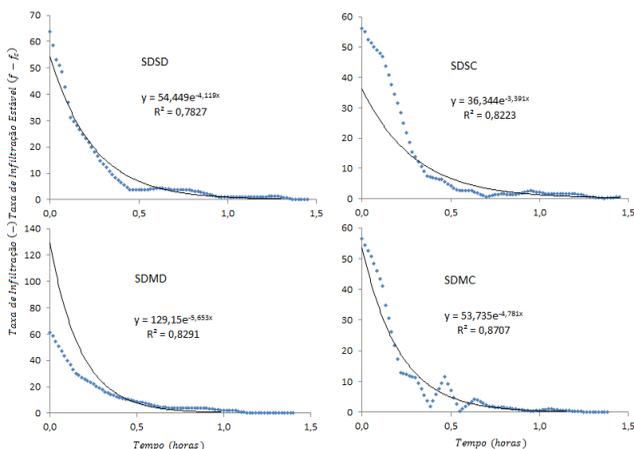
SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

ANEXO S – Gráficos de  $(f - f_c) \times t$ .  $f$ : Taxa de infiltração no tempo  $t$ .  $f_c$ : taxa de infiltração estável para o experimento 4.

Terceiro teste de chuva simulada.



Quarto teste de chuva simulada.



SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Mariotti (2012)

ANEXO T – Parâmetro de decaimento da taxa de infiltração,  $\phi$ , da equação de Horton. Com base nos anexos 36 à 39, nos diferentes sistemas de preparo do solo e chuvas simuladas aplicadas. Ajustados pelos gráficos de  $(f - f_c) \times t$ . Valores médios recomendados para os experimentos 4 e 5.

Tratamentos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média
SDSD	4,34	8,61	6,03	4,12	5,77
SDSC	3,58	4,63	5,57	3,39	4,29
SDMD	3,64	7,60	6,46	5,65	5,84
SDMC	4,02	7,18	4,93	4,78	5,23

SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Marioti (2012)

ANEXO U - Intensidade de chuvas observadas; Quantidade de chuvas observadas; Declividade média das parcelas experimentais; Rugosidade aleatória da superfície do solo e cobertura do solo residual e vegetal e parâmetro de decaimento da taxa de infiltração da equação de Horton, em cada tratamento, no cultivo do milho e da soja, nos testes de chuva simulada.

Treatamentos	Milho	Soja	Feijão	Milho/Feijão
	Intensidade/Quantidade real das chuvas observadas (mm h <sup>-1</sup> )			
Teste 1	64,65	71,60	64,70	71,60
Teste 2	63,20	62,00	63,20	62,00
Teste 3	60,20	60,50	60,20	60,50
Teste 4	63,70	63,40	63,70	63,40
	Rugosidade aleatória da superfície do solo (cm)			
Teste 1	1,91	1,91	1,91	1,91
Teste 2	1,91	1,91	1,91	1,91
Teste 3	0,85	0,85	0,85	0,85
Teste 4	0,85	0,85	0,85	0,85
	Declividade média das parcelas experimentais (m m <sup>-2</sup> )			
	13,60	13,70	13,10	14,10
	Cobertura do solo por resíduos culturais (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )			
Teste 1	0,80	0,80	0,80	0,80
Teste 2	0,50	0,50	0,50	0,50
Teste 3	0,50	0,50	0,80	0,80
Teste 4	0,95	0,80	0,65	0,80
	Cobertura do solo pela copa das plantas (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )			
Teste 1	0,10	0,08	0,10	0,12
Teste 2	0,25	0,20	0,28	0,30
Teste 3	0,55	0,50	0,75	0,65
Teste 4	0,95	0,90	0,00	0,60
	Taxa de infiltração estável, $f_c$ (mm h <sup>-1</sup> )			
Teste 1	28,06	22,45	34,29	29,76
Teste 2	20,05	18,10	20,51	17,60
Teste 3	29,86	31,16	13,30	16,78
Teste 4	12,28	11,64	4,45	7,91
	Parâmetro de decaimento da taxa de infiltração, $\phi$ , da equação de Horton. Valores médios recomendados			
	5,77	4,29	5,84	5,23

SDSD: semeadura direta de soja em declive; SDSC: semeadura direta de soja em contorno; SDMD: semeadura direta de milho em declive; SDMC: semeadura direta de milho em contorno. Fonte: Próprio autor. Nota: Com base nos dados de Bertol et al., (2013)