

ANO
2015

JÚLIO CÉSAR RAMOS | COBERTURA E RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE NA PROPOSIÇÃO
DE INDICADORES DE QUALIDADE DE UM CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADOS AO
CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Com o auxílio da análise de trilha, este estudo objetivou identificar e quantificar indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica. O experimento foi desenvolvido em campo, entre maio de 2011 e abril de 2013, em um Cambissolo Húmico com declividade média de 0,134 m m⁻¹, no sul do Brasil, sob condição de chuva simulada com intensidade planejada de 65 mm h⁻¹ e 90 minutos de duração. Os tratamentos estudados foram: a) solo cultivado: sem preparo e coberto por resíduo cultural de azevém (*Lolium multiflorum*), com rugosidade mínima (SRA); sem preparo e coberto por resíduo cultural de ervilhaca (*Vicia sativa*), com rugosidade mínima (SRE); escarificado após o cultivo de azevém sem o resíduo cultural da parte aérea e mantendo-se apenas as raízes da cultura, com rugosidade alta (SEA); escarificado após o cultivo de ervilhaca sem o resíduo cultural da parte aérea e mantendo-se apenas as raízes da cultura, com rugosidade alta (SEE); b) solo sem cultivo: sem cobertura, escarificado, com rugosidade alta (SDE). Foram aplicadas oito chuvas simuladas em cada tratamento onde quantificou-se a cobertura do solo por resíduos, a rugosidade superficial, processos hidrológicos e alguns atributos físicos do solo, relacionando os resultados posteriormente.

Orientador: Ildegardis Bertol

Coorientador: Dadid José Miquelluti

Lages, 2015

TESE DE DOUTORADO

**COBERTURA E RUGOSIDADE DA
SUPERFÍCIE NA PROPOSIÇÃO DE
INDICADORES DE QUALIDADE DE
UM CAMBISSOLO HÚMICO
RELACIONADOS AO CONTROLE DA
EROSÃO HÍDRICA**

JÚLIO CÉSAR RAMOS

LAGES, 2015

JÚLIO CÉSAR RAMOS

**COBERTURA E RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE NA
PROPOSIÇÃO DE INDICADORES DE QUALIDADE DE UM
CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADOS AO CONTROLE
DA EROSÃO HÍDRICA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Pós-Graduação em Ciência
do Solo do Centro de Ciências
Agroveterinárias, da Universidade do
Estado de Santa Catarina, como
requisito parcial para a obtenção do
grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Ildegardis Bertol

LAGES, SC

2015

R175c Ramos, Júlio César

Cobertura e rugosidade da superfície na
proposição de indicadores de qualidade de um
Cambissolo Húmico relacionados ao controle da
erosão hídrica / Júlio César Ramos. - Lages,
2015.

200 p.: il.; 21 cm

Orientador: Ildegardis Bertol

Bibliografia: p. 169-188

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Lages, 2015.

1. Condições de superfície. 2. Propriedades do
solo. 3. Perdas de solo. 4. Perdas de água. I.
Ramos, Júlio César. II. Bertol, Ildegardis. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV.
Título

CDD: 631.45 - 20.ed.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do
CAV/ UDESC

JÚLIO CÉSAR RAMOS

**COBERTURA E RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE NA
PROPOSIÇÃO DE INDICADORES DE QUALIDADE DE UM
CAMBISSOLO HÚMICO RELACIONADOS AO CONTROLE
DA EROSÃO HÍDRICA**

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

Banca Examinadora

Orientador:

Dr. Ildegardis Bertol
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:

Dr. Álvaro Luiz Mafra
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:

Dr. Fabrício Tondello Barbosa
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:

Dr. Jefferson Schick
Instituto Federal Catarinense

Membro:

Dr. Elemar Antonino Cassol
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lages (SC), 24/06/2015

Dedico a minha família, em especial aos meus pais Túlio e Rita, por terem tornado isso possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela proteção ao longo dos anos e principalmente por seus ensinamentos que me proporcionam fazer as escolhas certas e sem os quais não teria alcançado este feito.

Aos meus pais Túlio Ramos e Rita de Cássia Ramos, pelo incontestável apoio e incentivo no decorrer desses anos, e pelo exemplo de honestidade e humildade que pretendo sempre seguir como exemplo de vida.

Ao meus irmãos Gean Carlos Ramos e Caroline Maiara Ramos pela grande amizade construída nesses anos de nossas vidas e por fazerem parte da minha vida.

Aos meus parentes, que de alguma forma contribuíram e me ajudaram nessa jornada até aqui, desejo-lhes os meus mais sinceros agradecimentos.

À Flávia, aquela que foi minha companheira na maior parte do doutorado, e que sempre me apoiou e incentivou.

Ao professor e amigo Ildegardis Bertol, pela honra de ser seu orientado e por tudo que tem feito por mim, seja como amigo, professor ou orientador.

Aos professores do departamento de solos do CAV-UDESC, em especial meus co-orientadores David José Miquelluti e Fabrício Tondello Barbosa, e ao professor Álvaro Luiz Mafrá pelo auxílio.

Aos amigos e colegas do laboratório de uso e conservação do solo, em especial ao José, Douglas, Danieli, Maria, Bárbara, Vinícius, Murilo, Fernando, e demais colaboradores pela ajuda e bons momentos vividos nesses anos.

Aos colegas e amigos de graduação de longa data, os quais alguns ainda tenho o prazer de ter a companhia.

Aos meu amigo de “república” Murilo e ao Neganeve e o Teles pela hospitalidade recente.

Ao amigos de longa data, Romeu e Fernanda.

À UDESC pela formação profissional e a CAPES pela bolsa de estudos, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC, por parte dos recursos financeiros concedidos para a realização deste trabalho.

As demais pessoas que de alguma maneira contribuíram em minha vida.

MUITO OBRIGADO A TODOS!

RESUMO

RAMOS, Júlio César. **Cobertura e rugosidade da superfície na proposição de indicadores de qualidade de um Cambissolo Húmico relacionados ao controle da erosão hídrica.** 2015. 200p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo – Área de Manejo e Conservação do Solo). Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Lages, SC, 2015.

Os sistemas de manejo do solo diferem quanto às condições de superfície e atributos físicos e, conseqüentemente, no controle da erosão hídrica. Índices de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica podem ser gerados por meio de relações das perdas de solo e água e velocidade da enxurrada com as condições de superfície e atributos físicos do solo, os quais, direta e indiretamente influenciam a erosão. Com o auxílio da análise de trilha, este estudo objetivou identificar e quantificar indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica. O experimento foi desenvolvido em campo, entre maio de 2011 e abril de 2013, em um Cambissolo Húmico com declividade média de $0,134 \text{ m m}^{-1}$, no sul do Brasil, sob condição de chuva simulada com intensidade planejada de 65 mm h^{-1} e 90 minutos de duração. Os tratamentos estudados foram: a) solo cultivado: sem preparo e coberto por resíduo cultural de azevém (*Lolium multiflorum*), com rugosidade mínima (SRA); sem preparo e coberto por resíduo cultural de ervilhaca (*Vicia sativa*), com rugosidade mínima (SRE); escarificado após o cultivo de azevém sem o resíduo cultural da parte aérea e mantendo-se apenas as raízes da cultura, com rugosidade alta (SEA); escarificado após o cultivo de ervilhaca sem o resíduo cultural da parte aérea e mantendo-se apenas as raízes da cultura, com rugosidade alta (SEE); b) solo sem cultivo: sem cobertura, escarificado, com rugosidade alta (SDE). Foram aplicadas oito chuvas simuladas em cada tratamento, respectivamente nos dias 17/12/2011, 10/01/2012, 07/02/2012, 10/03/2012, 11/05/2012, 18/08/2012, 02/11/2012 e 18/12/2012. Em cada chuva aplicada, quantificou-se a cobertura do solo por resíduos, a rugosidade superficial, processos hidrológicos e alguns atributos físicos do solo, relacionando os resultados posteriormente. As perdas de solo são menores quando o solo é coberto por massa de resíduo de azevém do que ervilhaca. No solo coberto por massa de resíduo de ervilhaca, as perdas de solo não diferem às do solo escarificado contendo apenas raízes de azevém. A escarificação

do solo onde mantém-se somente as raízes das culturas de azevém e ervilhaca, diminui o teor de carbono orgânico total, o diâmetro médio geométrico dos agregados e aumenta a densidade do solo em comparação ao solo cultivado e coberto com os resíduos destas culturas. A análise de trilha mostra que a cobertura e rugosidade superficial do solo, taxa de infiltração de água, carbono orgânico total e diâmetro médio geométrico dos agregados têm estreita relação com as perdas de solo e água e velocidade de escoamento superficial em um Cambissolo Húmico, e podem ser utilizadas como indicadoras de qualidade do solo do ponto de vista de sua resistência à erosão hídrica. Em um solo rugoso, o carbono orgânico total, o diâmetro médio geométrico dos agregados, a massa de raízes e a macroporosidade do solo tem maior peso como indicadoras para efeito de resistência do solo à erosão hídrica. Entretanto, na presença de cobertura do solo por resíduos culturais, as referidas propriedades tem menor peso como indicadoras de qualidade do solo para erosão.

Palavras chave: condições de superfície, propriedades do solo, perdas de solo, perdas de água.

ABSTRACT

RAMOS, Júlio César. **Cover and surface roughness on proposing of quality indicators of a Humic Dystrucept related to the control of water erosion.** 2015. 200p. Thesis (Doctorate in Soil Science – Area of Management and Soil Conservation). Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Lages, SC, 2015.

Soil management systems differ in the surface conditions and physical attributes and, consequently, on water erosion control. Soil quality indicators with a view to reducing water erosion can be generated by relationships of soil and water losses and runoff velocity with surface conditions and physical soil properties, which directly and indirectly influence the erosion. With the support of path coefficient analysis, this study aimed to identify and quantify indicators of soil quality in order to reduction of water erosion. The experiment was developed in the field, between May 2011 and April 2013, on a Humic Dystrucept with a mean slope of 0.134 m m⁻¹, in southern Brazil under simulated rainfall condition with controlled intensity of 65 mm h⁻¹ for 90 minutes of duration each one. The treatments were: a) cultivated soil: no tilled and covered by ryegrass (*Lolium multiflorum*) residue, with minimal roughness (HCR); no tilled and covered by vetch (*Vicia sativa*) residue, with minimal roughness (HCV); chiseled soil after ryegrass crop removing the above-ground residues and maintaining only the root system, with high roughness (HRR); chiseled soil after vetch crop removing the above-ground residues and maintaining only the root system, with high roughness (HRV); b) Uncultivated soil: bare and chiseled soil, with high roughness (BHR). Eight simulated rainfall were applied to each treatment, respectively on the days 17/12/2011, 10/01/2012, 07/02/2012, 10/03/2012, 11/05/2012, 18/08/2012, 02 / 11/2012 and 18/12/2012. In each rainfall applied, quantified the soil cover by residues, surface roughness, hydrological processes and some soil physical properties, relating the results later. The soil loss are less when the soil is covered by ryegrass residue than vetch. In soil covered by vetch residue, soil losses are equal to the chiseling containing only ryegrass roots. The soil scarification which remains only roots of ryegrass and vetch crops, reduces the total organic carbon content, the geometric mean diameter of the aggregates and increases soil density compared to the

cultivated soil and covered with residues of these crops. The path coefficient analysis shows that the cover and the soil surface roughness, rate of water infiltration, total organic carbon and geometrical average diameter of aggregates are closely related to soil and water losses and runoff velocity on a Humic Dystrucept, and can be used as soil quality indicators to your resistance to water erosion. On a rough soil, the total organic carbon content, the geometric mean diameter of the aggregates, the root mass of roots and soil macroporosity have greater influence as indicators for soil resistance effect to water erosion. However, in the presence of soil cover by crop residues, such properties have lower weight as soil quality indicators to erosion.

Key words: surface conditions, soil properties, soil losses, water losses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Visualização da superfície do solo antes da escarificação no tratamento solo cultivado e escarificado contendo apenas as raízes da cultura de azevém (SEA).	63
Figura 2 - Visualização individual de cada tratamento estudado, onde (a); SRA (b); SRE; (c): SEA; (d): SEE e; (e): SDE.....	65
Figura 3 - Simulador de chuva tipo empuxo, cobrindo simultaneamente duas parcelas experimentais.....	67
Figura 4 - Rugosímetro de varetas de alumínio posicionado sobre os suportes de mandeira sobre a parcela experimental.	69
Figura 5 - Visualização da determinação da porcentagem de cobertura do solo pelo método da corda marcada (a), e da massa de resíduos com o uso do retângulo de madeira (b).	71
Figura 6 - Visualização das coletas realizadas em campo para determinação do volume da enxurrada (a), e para determinação da concentração de sedimentos na enxurrada (b).....	72
Figura 7 - Teor de carbono orgânico total na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	90
Figura 8 - Diâmetro médio geométrico na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	94
Figura 9 - Densidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	96
Figura 10 - Porosidade total na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	98
Figura 11 - Macroporosidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	100
Figura 12 - Microporosidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	101
Figura 13 - Teores de água gravimétrica no solo antecedente às chuvas nas camas de 0-0,1 m, (a), e 0,1-0,2 m, (b), nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	103
Figura 14 - Massa de raízes estimada para os tratamentos com cultivo de azevém e ervilhaca.....	105
Figura 15 - Rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	108
Figura 16 - Relação entre a massa vegetal das culturas (MR) com o tempo, (a), e relação da cobertura do solo por resíduos culturais	

(CS) com a MR, (b), nos tratamentos cobertos por resíduos culturais, em um Cambissolo Húmico.	110
Figura 17 - Relação entre a cobertura do solo (CS) com o tempo para os tratamentos SRA e SRE.	111
Figura 18 - Tempo de início de escoamento nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	114
Figura 19 - Perdas de solo nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	117
Figura 20 - Relação temporal das perdas de solo (PS) com a cobertura por resíduos culturais (CS), (a), e relação das PS com a rugosidade superficial ao acaso (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.	119
Figura 21 - Perdas de água dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	122
Figura 22 - Taxa constante de infiltração de água no solo dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	124
Figura 23 - Velocidade de enxurrada dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	126
Figura 24 - Relação da velocidade da enxurrada (VE) com a cobertura do solo (CS), (a), e da VE com a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.	127
Figura 25 - Índice D_{50} dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	129
Figura 26 - Relação do D_{50} com a cobertura do solo (CS), (a), e do D_{50} com a rugosidade superficial do solo (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.	131
Figura 27 - Relação do índice D_{50} (D_{50}) com a velocidade da enxurrada (VE), nos tratamentos estudados, em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.	132
Figura 28 - Relação da concentração de sedimentos na enxurrada dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	134
Figura 29 - Profundidade do fluxo total dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	137
Figura 30 - Tensão cisalhante da enxurrada nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.	139
Figura 31 - Coeficiente de rugosidade de Manning nos tratamento estudados, em um Cambissolo Húmico.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções específicas e indicadores de qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica. (continua)	53
Tabela 2 - Sugestão de nova forma de consideração da qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica causada pela água da chuva.	57
Tabela 3 - Caracterização da área: teor de areia (AR), silte (SI) e argila (AG), carbono orgânico total (COT), densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP), porosidade total (PT), macroporos (MAP), microporos (MIP) e estabilidade dos agregados em água (DMG), para as profundidades de 0 – 0,025; 0,025 – 0,05; 0,05 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m (média das repetições).	60
Tabela 4 - Intensidade e altura das chuvas simuladas e altura da chuva natural, bem como o EI das chuvas simuladas e o EI ₃₀ das chuvas naturais.	77
Tabela 5 - Valores de p pelo DMS de Fisher para os fatores tratamentos (Trat), testes de chuva simulada (T) e interação (Trat x T) para as variáveis estudadas, em um Cambissolo Húmico.	87
Tabela 6 - Valores médios dos tratamentos após os oito testes de chuva para as propriedades físicas e químicas do solo estudadas, em um Cambissolo Húmico.	88
Tabela 7 - Resultados da análise estatística da variância pelo modelo MIXED correspondente aos cinco tratamentos, oito testes de chuva e interação entre os tratamentos e os testes para a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR), massa de resíduos culturais (MR) e porcentagem de cobertura do solo por resíduos culturais (CS), em um Cambissolo Húmico.	106
Tabela 8 - Valores de p pelo DMS de Fisher para os fatores tratamentos (Trat), testes de chuva simulada (T) e interação (Trat x T) para alguns parâmetros relacionados à enxurrada, em um Cambissolo Húmico.	112
Tabela 9 - Valores médios dos parâmetros relacionados à enxurrada de cada tratamento após oito testes de chuva simulada, em um Cambissolo Húmico.	113
Tabela 11 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de solo	

	para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.	142
Tabela 12-	Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de solo para os tratamentos com rugosidade do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.	143
Tabela 13 -	Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de água para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.	144
Tabela 14 -	Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de água para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.....	145
Tabela 15 -	Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com a velocidade da enxurrada para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.....	146
Tabela 16 -	Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com a velocidade da enxurrada para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.	147
Tabela 17 -	Análise de trilha entre a variável básica perda de solo com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.	149
Tabela 18 -	Análise de trilha entre a variável básica perda de solo com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.	150
Tabela 19 –	Análise de trilha entre a variável básica perda de água com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.	151
Tabela 20 -	Análise de trilha entre a variável básica perda de água com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo, em um Cambissolo Húmico.	153
Tabela 21 -	Análise de trilha entre a variável básica velocidade de escoamento com as variáveis explicativas estudadas para os	

	tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.	154
Tabela 22	- Análise de trilha entre a variável básica velocidade de escoamento com as variáveis explicativas estudadas para os tratamentos com alta rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.	155
Tabela 23	- Sugestão de indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica, baseados nos resultados obtidos, para um Cambissolo Húmico.	159

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 HIPÓTESES.....	26
1.2 OBJETIVOS	27
1.2.1 Geral.....	27
1.2.2 Específicos.....	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 PREDIÇÃO DA EROÇÃO DO SOLO	31
2.1.1 Fator cobertura e manejo da RUSLE.....	35
2.1.1.1 Cobertura do solo por resíduos culturais.....	38
2.1.1.2 Rugosidade superficial do solo	40
2.2 DEGRADAÇÃO E QUALIDADE DO SOLO	43
2.2.1 Avaliação da qualidade do solo por indicadores	45
2.2.2 Indicadores de qualidade do solo para a sua função de resistir à erosão hídrica.....	50
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	59
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	59
3.1.1 Solo	59
3.1.3 Unidade experimental.....	61
3.1.2 Histórico da área experimental	61
3.2 TRATAMENTOS	62
3.3 SIMULADOR DE CHUVA E CHUVAS SIMULADAS.....	66
3.4 DETERMINAÇÕES REALIZADAS NO SOLO ANTES DE CADA CHUVA SIMULADA.....	67
3.4.1 Amostras do solo para análises físicas e químicas.....	67
3.4.2 Rugosidade superficial do solo	68
3.4.3 Cobertura do solo e massa de resíduos culturais.....	70
3.4.4 Teor inicial de água no solo	71
3.5 DETERMINAÇÕES REALIZADAS DURANTE A CHUVA SIMULADA	72
3.5.1 Taxa de enxurrada	72
3.5.2 Velocidade de escoamento	73
3.5.3 Índice D ₅₀ dos sedimentos transportados na enxurrada	73
3.5.4 Volume e intensidade de chuva	73
3.6 PROCEDIMENTOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO E ESCRITÓRIO.....	74
3.6.1 Recepção e processamento das amostras	74
3.6.2 Análises físicas e químicas das amostras de solo	75

3.6.3 Cálculo da intensidade, quantidade de chuva aplicada e erosividade das chuvas	75
3.6.4 Cálculo das perdas de solo e água e concentração de sedimentos	79
3.6.5 Cálculo da rugosidade superficial do solo	81
3.6.6 Cálculo do índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada	81
3.6.7 Profundidade total do fluxo, tensão cisalhante da enxurrada e coeficiente de rugosidade de manning	82
3.6.8 Estimativa da massa de raízes	83
3.6.9 Delineamento experimental, análise estatística, e análise dos dados para gerar os indicadores de qualidade do solo	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1 PROPRIEDADES DO SOLO	87
4.1.1 Teor de carbono orgânico total (COT)	88
4.1.2 Estabilidade de agregados em água (DMG)	91
4.1.3 Densidade do solo (DS)	94
4.1.4 Porosidade total do solo (PT)	97
4.1.5 Macroporosidade do solo (MAP)	99
4.1.6 Microporosidade do solo (MIP)	100
4.1.7 Teor de água no solo (UG)	102
4.1.8 Massa de raízes estimada (MRE)	104
4.2 CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DO SOLO	106
4.2.1 Rugosidade superficial do solo (RR)	106
4.2.2 Massa de resíduos culturais (MR) e cobertura do solo pelos resíduos (CS)	109
4.3 PARÂMETROS RELACIONADOS À ENXURRADA	111
4.3.1 Tempo de início de escoamento (TI)	113
4.3.2 Perdas de solo (PS)	115
4.3.3 Perdas de água (PA)	120
4.3.4 Taxa constante de infiltração de água no solo (TCI)	122
4.3.5 Velocidade da enxurrada (VE)	124
4.3.6 Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada (D_{50})	127
4.3.7 Concentração de sedimentos na enxurrada (CSE)	133
4.3.8 Profundidade total do fluxo (Y)	135
4.3.9 Tensão cisalhante da enxurrada (τ)	137
4.3.10 Coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning (nr)	139
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DE SUPERFÍCIE E DE SUBSUPERFÍCIE DO SOLO E AS PERDAS DE SOLO E ÁGUA E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	141

4.4.1 Correlação entre os atributos de superfície e subsuperfície do solo e as perdas de solo, perdas de água e velocidade da enxurrada	141
4.5 ANÁLISE DE TRILHA DAS PERDAS DE SOLO, PERDAS DE ÁGUA E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO COM OS ATRIBUTOS E SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE DO SOLO	148
4.5.1 Análise de trilha das perdas de solo com os atributos de superfície e subsuperfície do solo	148
4.5.2 Análise de trilha das perdas de água com os atributos de superfície e subsuperfície do solo	150
4.5.3 Análise de trilha da velocidade da enxurrada com os atributos de superfície e subsuperfície do solo	153
4.6 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO COM VISTA A REDUÇÃO DAS PERDAS DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA.....	156
4.6.1 Interpretação dos resultados	156
4.6.2 Proposição de valores como indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica	158
4.6.2.1 Função específica de resistir à degradação física por impacto das gotas de chuva	160
4.6.2.2 Função específica de facilitar a entrada de água no solo ...	163
4.6.2.3 Função específica de resistir à degradação e transporte por escoamento superficial	164
4.6.2.4 Função específica de facilitar o transporte e o armazenamento interno de água	165
5 CONCLUSÕES	167
REFERÊNCIAS	169
APÊNDICES.....	189

1 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica é um fenômeno que ocorre naturalmente na superfície da terra desde tempos remotos, sendo, inclusive, responsável pela modelagem das paisagens e pela gênese dos solos no decorrer das eras. Entretanto, a erosão induzida, ocasionada pelas atividades antrópicas, ocasiona o empobrecimento químico gradativo do solo, a sua degradação física, a inutilização das áreas, o assoreamento de rios e dos mananciais hídricos, potencializando enchentes e eutrofizando conjuntamente as águas. A recuperação dos impactos ambientais das áreas atingidas pela erosão ou a sua mitigação, necessitam grande investimento econômico, tornando-se muitas vezes inviável em algumas situações, tornando a área improdutiva.

A erosão hídrica depende, basicamente, dos fatores clima, solo, relevo, cobertura e manejo e práticas de suporte. Destes, o fator cobertura e manejo é o fator que pode ser alterado com mais facilidade na magnitude da ocorrência deste fenômeno.

Aproximadamente 25% dos solos agrícolas possuem algum grau de degradação, principalmente em função da erosão. Segundo a FAO (2011), estima-se que a erosão é responsável por 84% da degradação de solo no mundo e, destes, a erosão hídrica é responsável por 56% e a erosão eólica 28%. Igualmente, estima-se que a erosão movimenta mais de 100 bilhões de toneladas de solo por ano sobre o planeta, onde aproximadamente 80% deste solo é depositado na mesma área erodida ou em áreas da topo-sequência adjacente e, os 20% restantes, são transportados para dentro de mananciais de água, incluindo açudes, barragens, cursos d'água, mares e oceanos.

A região sul do Brasil ocupa importante posição na produção agrícola nacional, no que se refere à produção de algumas culturas. Esta região possui, na sua grande maioria, solos com alta suscetibilidade à erosão hídrica, e vem sofrendo, por isso, constante degradação causada por ela, cuja degradação

é associada ao intenso uso e cultivo do solo, facilitada pela forma de relevo ondulado predominante na região. Este tem sido um dos principais fatores que contribuem para a diminuição da produtividade das culturas. Tais agravantes corroboram e justificam a condução de estudos de erosão hídrica, a fim de prever corretamente a magnitude da erosão ocorrente, e minimizar os seus efeitos degradantes sobre o solo.

Os diferentes cultivos do solo e sistemas de manejo se diferenciam quanto à suscetibilidade à erosão hídrica em áreas cultivadas, devido sua influência nas condições físicas na camada superficial do solo. Nessa camada, especialmente a cobertura por resíduos culturais e a rugosidade na superfície e, abaixo dela, a densidade, porosidade e estabilidade dos agregados, apresentam papel decisivo na dinâmica da água e na erosão hídrica. Das relações entre a erosão hídrica e as condições físicas da camada superficial do solo podem ser obtidos modelos e parâmetros para gerar índices de qualidade física do solo com vistas à redução da erosão.

Para que este modelo possa ser utilizado, o mesmo deve ser alimentado por parâmetros que devem ser gerados por meio de pesquisas em erosão hídrica sob condições de chuva simulada em campo. Tais pesquisas devem explorar as relações entre perdas de solo e água por erosão e os atributos da camada superficial do solo que dependem do sistema de manejo do solo. Alguns sistemas conservacionistas de manejo caracterizam-se por manter os resíduos culturais sobre a superfície e pelo não revolvimento do solo e, por isso, são eficazes no controle da erosão hídrica, como, por exemplo, a semeadura direta. Outros sistemas, também conservacionistas, se caracterizam por elevada rugosidade superficial e, por isso, são eficazes especialmente por aumentar a armazenagem superficial e a infiltração de água no solo, como, por exemplo, o preparo pouco intenso do solo realizado com escarificador.

Estudos aprofundados e devidamente controlados, relacionando a erosão hídrica e os atributos da camada

superficial do solo, com consequente geração de índices de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica são ainda escassos no Brasil. Discute-se sobre a geração de índices (números) de qualidade do solo para cada ecossistema brasileiro, porém, diverge-se quanto à importância relativa de cada atributo na composição de tais índices. Isso dificulta a estimativa da capacidade do solo em resistir à erosão hídrica e, com isso, impossibilita utilizar modelos para prever a magnitude da erosão nas diversas situações de cultivo do solo.

Almejando contribuir para a solução desses problemas, este projeto foi desenvolvido em Lages, SC, com o intuito de estabelecer indicadores de qualidade do solo quanto à sua suscetibilidade à erosão hídrica.

1.1 HIPÓTESES

1. Os resíduos culturais de azevém e de ervilhaca sobre a superfície do solo são mais eficazes na redução da erosão hídrica do que a rugosidade superficial ocasionada pela escarificação no mesmo solo contendo apenas as raízes das mesmas culturas.
2. O cultivo com azevém afeta positivamente as propriedades físicas e químicas do solo em comparação ao de ervilhaca, independentemente se os resíduos são mantidos na superfície, ou se os mesmos são retirados mantendo-se apenas as raízes e o solo escarificando e, sob estes cultivos, as propriedades do solo são mais adequadas do que sob um solo sem cultivo e escarificado.
3. A mobilização do solo pela escarificação diminui o teor de carbono orgânico, afeta negativamente a estrutura e os demais atributos físicos, em comparação ao solo sem mobilização e coberto por resíduos culturais.
4. Em decorrência do exposto nos itens 3, 4 e 5, é possível identificar e estabelecer pesos aos atributos do solo de acordo com a influência de cada um deles na diminuição da erosão hídrica e, com isso, gerar indicadores de qualidade do solo com vistas a sua resistência a erosão hídrica.
5. A cobertura do solo por resíduos culturais é melhor indicadora de qualidade do solo do que a rugosidade superficial e, ambas, são melhores indicadoras do que as características de subsuperfície, as quais têm maior importância em condição de solo escarificado, independentemente do cultivo do solo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Quantificar a erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e manejo do solo, determinar as características de superfície e subsuperfície e estabelecer correlações entre as variáveis com o intuito de sugerir indicadores de qualidade do solo quanto à sua resistência à erosão hídrica.

1.2.2 Específicos

1. Quantificar a erosão hídrica sob cultivo de azevém e ervilhaca, nas condições de solo cultivado e coberto pelos resíduos culturais, sob solo cultivado pelas mesmas culturas, onde se retiraram os resíduos, escarificando o solo onde se manteve apenas as raízes destas culturas, e sob solo sem cultivo, descoberto e escarificado.
2. Avaliar as propriedades do solo em dois tratamentos, um coberto pelos resíduos culturais de azevém e outro de ervilhaca, outros dois escarificados, um contendo apenas as raízes de azevém e outro, raízes de ervilhaca e, em outro tratamento, em solo sem cultivo e escarificado.
3. Correlacionar os atributos físicos e químicos do solo com as perdas de solo e água e com a velocidade da enxurrada, a fim de gerar indicadores de qualidade quanto à resistência do solo à erosão hídrica.
4. Com base nos resultados encontrados e relações estabelecidas, identificar atributos de superfície e subsuperfície que sirvam de indicadores de qualidade do solo quanto à sua resistência à erosão hídrica, atribuindo peso a cada atributo, relativo à sua influência sobre a erosão hídrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de erosão hídrica envolve a desagregação de partículas do solo da sua massa original e remoção das partículas para fora da área (HUDSON, 1995; CASSOL & LIMA, 2003), diferenciando-se de acordo com os agentes causadores, destacando-se a erosão hídrica pluvial e a erosão eólica. A erosão eólica é causada pelo vento, enquanto a erosão hídrica pluvial do solo é aquela causada pela água da chuva, sendo constituída pelas fases de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos (ELLISON, 1947; FOSTER & MEYER, 1977; HUDSON, 1995). As fases ocorrem simultaneamente no campo, dificultando dessa forma a sua distinção (ELLISON, 1947). A magnitude da erosão hídrica depende da capacidade de cada solo em resistir a alguma dessas fases. Assim, a erosão hídrica pluvial do solo é o produto resultante do poder da chuva em originar erosão e do solo em resistir a ela, havendo fatores que interferem na capacidade da chuva e do escoamento em causar erosão e aqueles que condicionam ao solo uma maior resistência (RENARD et al., 1997), podendo-se destacar o clima, solo, topografia do terreno, cobertura e o manejo do solo e práticas conservacionistas complementares (WISCHIMEIER & SMITH, 1978).

A desagregação, primeira fase da erosão hídrica pluvial, consiste no desprendimento das partículas ou de agregados da massa de solo original pela energia cinética das gotas de chuva ao impactarem diretamente sobre o solo e, em menor grau, pelo escoamento superficial que contém energia cisalhante (WISCHIMEIER & SMITH, 1978). Na segunda etapa da erosão hídrica pluvial, o transporte, as partículas desprendidas da massa do solo são carregadas para fora da área original pela energia do escoamento superficial e, em menor grau, pelo salpicamento do solo pelas gotas de chuva.

A última etapa da erosão hídrica pluvial, a deposição, nada mais é que a sedimentação das partículas contidas no fluxo

superficial (HUDSON, 1995). A deposição ocorre quando a energia de transporte é inferior à quantidade de sedimentos presente no escoamento ou, ainda, quando a chuva cessa (ELLISON, 1947). A deposição é seletiva, onde as partículas mais grosseiras ou de maior densidade são depositadas primeiramente ao longo do comprimento da rampa (ELLISON, 1947).

A erosão hídrica pluvial, dependendo das condições superficiais do solo e da forma de atuação do agente erosivo, pode ocorrer na forma entressulcos ou em sulcos (ELLISON, 1947).

Erosão em entressulcos é aquela onde há a formação de uma lâmina de água sobre a superfície do solo, sem que aconteça a concentração da enxurrada em sulcos (CASSOL & LIMA, 2003; CASSOL et al., 2004). Nesta forma de erosão, o impacto das gotas de chuva é o fator responsável pela desagregação das partículas da massa do solo, podendo desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (FOSTER, 1982; FOSTER et al., 1985; CASSOL & LIMA, 2003; CASSOL et al., 2004). O transporte das partículas desagregadas é realizado, quase que exclusivamente, pelo fluxo laminar raso, e pela turbulência causada pela queda das gotas no filme de água sobre o solo (WISCHMEIER & SMITH 1958; FOSTER et al., 1985; HUDSON, 1995; BRAIDA & CASSOL, 1999; CASSOL & LIMA, 2003).

Mesmo sendo imperceptível a olho nu, a erosão em entressulcos pode ocasionar grandes perdas de solo (RENARD et al., 1997), principalmente por que a quantidade de solo disponível para a erosão em sulcos depende, necessariamente, da quantidade de solo cedida pela erosão em entressulcos. A magnitude da erosão em entressulcos é dependente da capacidade da chuva em desagregar o solo, sendo influenciada pela declividade do terreno, presença de vento, textura e

estrutura do solo e espessura do filme de água formado sobre o solo (ELLISON, 1947).

A erosão em sulcos é uma fase sequencial do processo erosivo, onde há mudança da forma do escoamento, passando de difuso, em entressulcos, para concentrado, na forma de sulcos de erosão (MEYER et al., 1975), sendo originada pela concentração da enxurrada na superfície do solo, cuja formação pode ser facilitada pela presença de marcas de preparo ou depressões naturais do terreno (BARBOSA et al., 2010; HUDSON, 1995; BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

A energia erosiva contida no fluxo concentrado nos sulcos é denominada cisalhante, pois corresponde à ação de uma força cortante, tangencial a superfície do solo, sendo uma função do peso específico da água, do raio hidráulico e da declividade do terreno (FOSTER et al., 1982a). A lâmina de água do escoamento laminar tem sua energia aumentada pelo impacto das gotas de chuva que produzem turbulência no fluxo (WISCHMEIER & SMITH, 1958), aumentando sua capacidade de desagregação e transporte, suspendendo e mantendo suspensas as partículas de solo dentro do fluxo turbulento (MEYER et al., 1975; FOSTER et al., 1982b).

2.1 PREDIÇÃO DA EROSÃO DO SOLO

Segundo Foster (1980), modelo de predição pode ser definido mais adequadamente como uma ferramenta que serve ao propósito que se intenciona à ela, dependendo intrinsecamente da perspectiva de cada usuário. A erosão do solo pode ser modelada de forma geral, onde todos os fatores que influenciam as três fases da erosão (desagregação, transporte e a deposição), são quantificados (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Igualmente, a erosão do solo pode ser modelada de forma específica, onde é quantificada a resposta de cada uma das fases da erosão frente aos fatores que a influenciam, separadamente (FLANAGAN & NEARING, 1995).

Segundo Nearing (2002), com base na utilidade dos resultados da modelagem, os objetivos da predição da erosão do solo por meio de modelos matemáticos podem ser divididos em três categorias: 1) no planejamento conservacionista de uso da terra, sendo utilizado como ferramenta para selecionar o uso e o manejo adequado das áreas e as práticas de conservação do solo mais apropriadas, visando redução da erosão e conservação do solo, para um local ou região em particular; 2) no estabelecimento de normas para adoção de práticas de controle da erosão e conservacionistas do solo, integrando as operações de manejo do solo na agricultura, na construção civil e na exploração florestal, pelos órgãos governamentais, em todos os seus níveis; e 3) no aumento dos conhecimentos e na sistematização dos mesmos, por parte dos profissionais, no que se refere à ciência da erosão e da conservação do solo. Contudo, a avaliação de eficácia das práticas conservacionistas na redução da erosão nas terras agrícolas é a aplicação mais importante e frequente dos modelos de predição da erosão do solo, através dos técnicos de campo e planejadores agrícolas em especial e praticado em geral nas áreas cultivadas com culturas anuais destinadas à produção de grãos.

Os modelos de predição da erosão hídrica do solo desenvolvidos até o momento são classificados como modelos matemáticos, de natureza empírica, híbrida ou fundamental. Os modelos matemáticos empíricos estabelecem as relações entre as variáveis que influenciam os fenômenos e entre os valores de seus parâmetros baseados em dados de observação, ou seja, dados provindos da experimentação. Essencialmente, estes modelos estimam a remoção física de solo (perda de solo) pelo fenômeno da erosão hídrica em escala de parcela.

Dentre os modelos matemáticos empíricos de predição existentes em nível mundial, e que possuem maior potencial para o Brasil, destacam-se a Equação Universal de Perda de Solo (USLE - *Universal Soil Loss Equation*), desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978), e a sua versão revisada e

melhorada por Renard et al. (1997), a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*).

Pela maior precisão, especificidade e maior gama de opções de uso, destaca-se a RUSLE. A RUSLE é um modelo de erosão empírico desenvolvido com o intuito de predizer a perda média anual de solo para um longo período de tempo, e não para eventos isolados, em áreas com topografia específica e sistemas específicos de cultivo e manejo (RENARD et al., 1997). Um grande avanço da RUSLE em relação à USLE, é sua operacionalização totalmente computadorizada, embora sua estrutura, apresente os mesmos fatores da USLE para se calcular a perda média anual de solo de um terreno inclinado, conforme a seguinte expressão matemática:

$$A = R K L S C P \quad [1]$$

Onde:

A = erosão média anual estimada, Mg ha⁻¹;

R = fator chuva e enxurrada associada (índice de erosividade), MJ mm⁻¹ ha⁻¹ h⁻¹;

K = fator solo (índice de erodibilidade), Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹;

L = fator comprimento de declive;

S = fator grau de declive;

C = fator cobertura e manejo; e

P = fator prática conservacionista de suporte.

A erosividade da chuva (fator R da RUSLE) é o valor numérico que expressa à habilidade potencial do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial em causar erosão (WISCHIMEIER & SMITH, 1978; HUDSON, 1995; RENARD et al., 1997). Dentro da variável climática, a erosividade da chuva é o fator mais importante, pois é a principal fonte de energia responsável pela erosão hídrica, oriunda da queda das gotas de chuva e do escoamento superficial (WISCHIMEIER & SMITH, 1958; MANNERING & MEYER, 1962).

A erosividade individual de cada chuva é dependente de suas características intrínsecas tais como intensidade

(WISCHMEYER & SMITH, 1958) e duração, além da frequência das chuvas. Dentre estas características, a intensidade é a mais importante na erosão hídrica (HUDSON, 1995).

A erodibilidade (fator K da RUSLE) é representada pela taxa de perda de solo por unidade de erosividade (RENARD et al., 1997). A erodibilidade do solo é definida como a vulnerabilidade ou suscetibilidade do solo à erosão hídrica, sendo a recíproca da sua resistência (WISCHMEIER & SMITH, 1978; BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990), e está correlacionada às propriedades do solo que afetam a velocidade de infiltração de água, permeabilidade e absorção de água no solo, resistência à dispersão e ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte da chuva e enxurrada (HUDSON, 1995).

O fator topográfico, representa a influência da inclinação (S) e do comprimento (L) do declive na magnitude da erosão hídrica (fator LS da RUSLE). Embora sejam avaliados separados, os fatores L e S ocorrem concomitantemente no campo, sendo agrupados em um único fator nos estudos de erosão hídrica (WISCHMEIER & SMITH, 1978; HUDSON, 1995; BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990). Qualquer alteração na inclinação e no comprimento do declive afeta a erosão laminar e erosão em sulcos (RENARD et al., 1997), pois afeta diretamente o volume e a velocidade da enxurrada. Entretanto, a erosão aumenta proporcionalmente mais com o aumento da declividade do que com o aumento do comprimento do declive, onde as perdas de solo são proporcionais ao fator L elevado a potência média de 0,5 e ao fator S elevado à potência média de 1,5 (HUDSON, 1995).

A cobertura e o manejo do solo (fator C da RUSLE) reflete a influência das operações de manejo do solo e da cobertura na taxa de erosão. Na RUSLE fator C é dividido em subfatores devido a sua variação temporal. Essa variação é condicionada a dependência das inter-relações entre a cobertura do solo por resíduos, cobertura pela copa das plantas, grau de mobilização do solo pelo efeito do preparo mecânico, efeito

residual do uso e manejo do solo, umidade do solo antecedente à chuva e erosividade da chuva (WISCHMEIER & SMITH, 1978; WISCHMEIER, 1975). É o fator mais importante para o controle da erosão hídrica, pois é aquele por meio do qual mais se pode alterar a magnitude da erosão (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

As práticas complementares ou de suporte (fator P da RUSLE), correspondem a razão da perda de solo entre uma específica prática de suporte, comparada com uma área mantida sem esta prática (parcela padrão da USLE). As práticas complementares visam diminuir o efeito de desagregar o solo ou de transportar os sedimentos desagregados pela chuva, modificando o padrão e o grau do fluxo, a direção do escoamento superficial e reduzindo a quantidade e a taxa de escoamento (RENARD & FOSTER, 1983). As práticas de suporte compreendem o cultivo em contorno, cultivo em faixas e o terraceamento (RENARD et al., 1997).

2.1.1 Fator cobertura e manejo da RUSLE

O fator C na USLE é obtido pela razão da perda de solo (SLR- *Soil Loss Ratio*) de um terreno cultivado numa dada condição de cultura e manejo, com a perda de solo de um terreno mantido continuamente descoberto e preparado convencionalmente no sentido do declive. Normalmente, os valores de SLR são calculados para intervalos de tempo, devido à interdependência dos fatores. Cada valor de SLR é ponderado pela fração da erosividade da chuva e enxurrada associada (EI). Os valores assim ponderados são, então, combinados num valor global de fator C. No caso da versão do modelo RUSLE, a SLR é computada pelo produto dos fatores que influenciam a erosão durante o ciclo de uma cultura, sendo conjuntamente considerados os efeitos das raízes (vivas e mortas) e resíduos culturais dos cultivos anteriores incorporados ao solo; consolidação da superfície do solo; cobertura do solo pela copa

das plantas; cobertura superficial do solo pelos resíduos culturais; e rugosidade superficial do solo, em termos de sua influência sobre a erosão hídrica (RENARD et al., 1997). O SLR da RUSLE é calculado com a seguinte equação, conforme descrito por Renard et al. (1997):

$$\text{SLR} = \text{PLU} \times \text{CC} \times \text{SC} \times \text{SR} \times \text{SM} \quad [2]$$

Onde:

SLR (*soil loss ratio*) = razão de perda de solo;

PLU (*prior land use*) = subfator uso anterior da terra;

CC (*canopy cover*) = subfator cobertura do solo pela copa da planta;

SC (*surface cover*) = subfator cobertura superficial do solo por resíduos;

SR (*surface roughness*) = subfator rugosidade superficial do solo; e

SM (*soil moisture*) = subfator umidade do solo.

O subfator PLU refere-se ao efeito residual do uso do solo, devido à influência do sistema radicular das plantas, da incorporação dos resíduos culturais, do preparo ou da sua ausência na rugosidade superficial e na consolidação da superfície. A importância que as raízes (vivas e mortas) e os resíduos culturais incorporados têm sobre as taxas de erosão, pode se manifestar de duas formas. Primeiro, as raízes das plantas e os resíduos culturais incorporados podem controlar a erosão mecanicamente, ligando fisicamente as partículas de solo entre si e agindo como barreira ao movimento de água e solo (RENARD et al., 1997). Segundo, as raízes das plantas influenciam fortemente na formação e na manutenção da estabilidade dos agregados do solo, devido à liberação de exsudatos orgânicos, que funcionam como agentes cimentantes e de ligação entre as partículas constituintes do solo (BRANDÃO & SILVA, 2012).

As operações de preparo do solo rompem as ligações entre os agregados, acelerando a decomposição da matéria orgânica, diminuindo a estabilidade dos agregados do solo, aumentando, conseqüentemente, a erodibilidade do solo. Após as operações de preparo, o solo tende a reconsolidar-se e tornar-se menos erodível, pois há uma consolidação da sua superfície e

alteração da sua estrutura, devido ao rearranjo de suas partículas, com consequente aumento na densidade e resistência ao cisalhamento pelos agentes erosivos (RENARD et al., 1997).

A copa das plantas diminui a velocidade com que a água chega no solo pela sua interceptação e, consequentemente, sua energia, de forma a retardar o escoamento superficial, o que facilita a infiltração de água no solo, diminui a desagregação de solo pelo impacto das gotas de chuva, uma vez que sua energia é dependente da sua velocidade (WISCHIMEIER & SMITH, 1958), reduzindo, consequentemente, as perdas por erosão e aumentando a transferência de água para a atmosfera (WISCHIMEIER & SMITH, 1978; BERTONI & PASTANA, 1964). Entretanto, a copa das plantas praticamente não exerce influência na velocidade do escoamento em chuvas longas e, dependendo da altura da planta, as gotas podem readquirir sua velocidade inicial e impactar o solo com alguma energia.

A cobertura do solo por resíduos culturais, dissipa a energia cinética das gotas de chuva, evitando que estas impactem diretamente sobre o solo, desagreguem as partículas e causem o encrostamento da superfície do mesmo (DULEY, 1939; MANNERING & MEYER, 1962). Ainda, a cobertura por resíduos diminui a velocidade, a energia e a capacidade do escoamento em causar desagregação e de transportar as partículas de solo (MANNERING & MEYER, 1962), além de aprisionar os sedimentos nos espaços existentes entre suas peças (LOPES et al., 1987a).

O aumento da rugosidade superficial ocasiona um aumento da porosidade interna do solo (ALLMARAS et al., 1966), aumentando o armazenamento interno de água (CURRENCE & LOVELY, 1970), e nas depressões da superfície do solo (ALLMARAS et al., 1966). Segundo Bertol et al. (1989), com o aumento da rugosidade superficial do solo, há aumento da retenção da água e dos sedimentos nas microdepressões criadas na superfície do solo. Além disso, a rugosidade superficial do solo exerce grande influência na redução da velocidade do escoamento

superficial e sua capacidade de desagregar o solo (BERTOL et al., 1989; ELTZ & NORTON, 1997).

2.1.1.1 Cobertura do solo por resíduos culturais

Os resíduos culturais protegem a superfície do solo e preservam as suas propriedades físicas. Ainda, quando mantidos sobre a superfície do solo, exercem a ciclagem de nutrientes e de carbono (GILMOUR et al., 1998). Ainda, Laflen & Colvin, (1981) concluíram, que, em solos arenosos, a diminuição do resíduo pode afetar ainda mais sua produtividade, aumentando, ainda, a necessidade de adubo a ser aplicado.

O principal benefício dos resíduos culturais sobre a superfície, é dissipar a energia cinética das gotas de chuva, evitando que estas impactem diretamente sobre o solo, ocasionando a desagregação das partículas e o encrostamento da superfície (DULEY, 1939; MANNERING & MEYER, 1962; BERTOL, et al., 1989). O encrostamento do solo tem como principal característica a diminuição da porosidade total, principalmente o volume de macroporos (BERTOL et al., 1989; DALLA ROSA et al., 2013b). Elisson (1947) encontrou diminuição de 85% do volume de macroporos em um solo sem cobertura em comparação à um solo coberto e sem crosta.

A cobertura por resíduos culturais proporciona maior infiltração de água ao evitar o encrostamento da superfície do solo (LOPES et al., 1987a; BERTOL et al., 1987; BERTOL et al., 1989) que, por sua vez, diminui a capacidade do escoamento em desagregar e transportar as partículas de solo (BERTOL et al., 1989; MANNERING & MEYER, 1962), diminuindo, assim, as perdas de solo (BERTOL, 1989; COGO, 1981), afetando, ainda, as perdas de água (LOPES et al., 1987b; BERTOL et al.; 1987; BERTOL et al. 1989). Bertol et al. (1989) encontraram perdas de solo e água 90% e 33% menores na presença de resíduos vegetais do que na sua ausência e com crosta superficial. Wischmeier & Smith (1978) mostraram que com

100% da superfície coberta por resíduos vegetais, praticamente eliminou-se a perda de solo.

Os resíduos culturais sobre a superfície diminuem a velocidade do escoamento (ELLISON, 1947) e agem como um filtro, aprisionando os sedimentos nos espaços existentes entre suas peças (LOPES et al., 1987b; BERTOL et al., 1987), onde a cobertura do solo por resíduos vegetais diminuiu o índice D_{50} dos agregados transportados pelo escoamento superficial, concordando com Lopes et al. (1987a) e Bertol et al. (1987). Segundo Laflen & Colvin (1981), a capacidade de armazenar sedimentos de tamanhos maiores define a capacidade do resíduo em diminuir a erosão hídrica.

A capacidade dos resíduos em controlar a erosão é variável, dependendo, principalmente, da porcentagem de solo coberto por resíduos (BERTOL et al., 1989). A porcentagem de área coberta determina quanto solo será desagregado e, conseqüentemente, se haverá ou não a formação de uma crosta sobre a superfície (MANNERING & MEYER, 1962). Entretanto, Dalla Rosa et al. (2013b), demonstraram que mesmo sob a presença de resíduos sobre a superfície do solo, há formação da crosta.

O tipo e o grau de preparo mecânico influenciam na capacidade do resíduo em reduzir a erosão hídrica, já que afetam as condições internas do solo, tais como porosidade, densidade e estabilidade dos agregados em água. Ainda, o preparo do solo afeta a porcentagem de resíduo remanescente sobre a superfície. Igualmente, os resíduos vegetais tem seu efeito alterado pelo comprimento do declive, a declividade do terreno e o sentido da semeadura, pois interferem no volume e velocidade da enxurrada (BERTOL et al., 2010; BARBOSA et al., 2012; SLONEKER & MOLDENHAUER, 1977; LAFLEN & COLVIN, 1981).

O tipo do resíduo, a sua distribuição e a quantidade de resíduo, interferem na eficiência relativa dos resíduos (SLONEKER & MOLDENHAUER, 1977). O volume de resíduo pode definir a capacidade de reter e aprisionar

sedimentos, bem como no diâmetro dos sedimentos aprisionados, variando com a declividade (LAFLÉN & COLVIN, 1981). A erodibilidade do solo também interfere na capacidade dos resíduos, pois alguns solos são mais facilmente desagregados, enquanto outros são mais facilmente transportados, tendo como consequência menor aprisionamento pelos resíduos na superfície do solo (SLONEKER & MOLDENHAUER, 1977).

A velocidade de decomposição dos resíduos culturais mantidos sobre a superfície afeta a eficácia do sistema de manejo em si. A eficiência da rotação de culturas depende da escolha das espécies vegetais utilizadas e de sua sequência (BERTOL et al., 2004). A persistência e o efeito benéfico dos resíduos culturais está associada intrinsecamente ao tipo de resíduo, pois as culturas diferem na produção de massa vegetal e em resistir à decomposição, dependendo da sua relação carbono/nitrogênio (GILMOUR et al., 1998), sendo afetado pelo tipo de solo. As propriedades tais como o teor de matéria orgânica, textura, estrutura e disponibilidade de nutrientes do solo podem acelerar ou diminuir a decomposição dos resíduos (BERTOL et al., 2004), sendo afetado, principalmente, pela temperatura e disponibilidade de água do local (STROO et al., 1989).

2.1.1.2 Rugosidade superficial do solo

A rugosidade representa o enrugamento da superfície do solo, sendo caracterizada pelo conjunto de microelevações e microdepressões na superfície, bem como sua distribuição espacial (ALLMARAS et al., 1966; CORREA et al., 2012). Naturalmente, os solos apresentam uma rugosidade superficial baixa, devido ao alisamento da superfície ocasionada pela desagregação das partículas pelas gotas de chuva, ou pelo trânsito sobre a superfície. Assim, a alteração da rugosidade, se dá principalmente, pelo uso de implementos agrícolas.

Com o preparo do solo podem ser produzidos dois tipos de rugosidade. A primeira, é a rugosidade orientada, que sofre influência das marcas de preparo e pode se observar a presença de cristas (elevações) e sulcos (depressões) ordenados na superfície do terreno, independente do sentido do declive. A segunda é a rugosidade ao acaso, caracterizada pela ocorrência de depressões e elevações aleatoriamente distribuídas na superfície do terreno, sem a distinção da direção das linhas de preparo.

O incremento da rugosidade superficial ocasiona aumento da porosidade interna do solo (ALLMARAS et al., 1966) e, conseqüentemente, a infiltração de água no solo (RÖMKENS & WANG, 1986; ELTZ & NORTON, 1997), o armazenamento interno de água (CURRENCE & LOVELY, 1970), além do armazenamento nas depressões da superfície do solo (BURWELL et al., 1963; ALLMARRAS et al., 1966).

Aumentando a rugosidade superficial do solo, as perdas de solo e água diminuem (BERTOL et al., 1989; ALLMARAS et al., 1966), efeito da maior infiltração de água no solo e retenção da água e dos sedimentos nas microdepressões da superfície do solo (DEXTER, 1977). Ainda, a rugosidade superficial do solo reduz a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, sua capacidade de desagregar e transportar o solo (BERTOL et al., 1989; ELTZ & NORTON 1997). A redução da velocidade do escoamento se dá pelo aumento da resistência hidráulica imprimida pela rugosidade ao escoamento superficial, além do aumento da distância a ser percorrido pelo fluxo (RAMOS et al., 2014).

A rugosidade superficial do solo depende, do revolvimento mecânico do solo (BERTOL et al., 1989; ALLMARAS et al., 1966) variando, desta forma, conforme o implemento utilizado (BURWELL & LARSON, 1969; ALLMARAS et al., 1967) e o grau ou número de operações realizadas (CORREA et al., 2012; ALLMARAS et al., 1967; BERTOL et al., 1989). Conforme destacado por Allmaras et al. (1967) e Bertol et al. (1989), quanto menor for a intensidade de

mobilização do solo, maior será sua rugosidade (com exceção da semeadura direta) e, conseqüentemente, retardará a consolidação da superfície e maior será a cobertura do solo por restos culturais existentes.

O tipo de solo afeta a rugosidade resultante após uma operação de preparo (ALLMARAS et al., 1966), juntamente com a umidade no momento do preparo (ALLMARAS et al., 1967), pois interfere nas forças de adesão e coesão das partículas, proporcionando ao solo maior ou menor resistência ao rompimento pelo implemento. Igualmente, o uso e o manejo da área podem interferir na resistência do solo ao rompimento pelos implementos (ZOLDAN JUNIOR et al., 2008). Allmaras et al. (1966) encontraram menor rugosidade superficial do solo após o preparo em solo cultivado com alfafa em relação as outras culturas, concordando com Allmaras et al. (1967), onde encontraram uma amplitude de rugosidade menor ao revolver um solo recém-cultivado com milho.

Com o decorrer do tempo, o impacto das gotas sobre a superfície do solo diminui a rugosidade da superfície, principalmente em um solo descoberto. Dexter (1977) observou decaimento linear da rugosidade superficial com o acúmulo da energia da chuva. Cogo (1981) e Zoldan Júnior et al. (2008), encontraram decaimentos exponenciais da rugosidade superficial, devido um maior decaimento inicial da rugosidade superficial. Segundo Ramos et al. (2014) a rápida diminuição da rugosidade após a primeira chuva é devida à diminuição da porosidade pelo selamento superficial, pela quebra e desagregação de torrões após o umedecimento e, em menor grau, pela deposição de sedimentos nas microdepressões e assentamento do solo.

A velocidade com que a rugosidade diminui depende das propriedades do solo, correlacionando-se inversamente com a estabilidade dos agregados do solo (BERTOL et al., 2006). Potter (1990) observou que a estabilidade da rugosidade aumentou com o teor de matéria orgânica do solo e concluiu que

a estabilidade da rugosidade diminuiu com os teores de argila acima de 31%.

2.2 DEGRADAÇÃO E QUALIDADE DO SOLO

A erosão é responsável por 84% da degradação das terras, destacando-se a erosão hídrica com 56% e a eólica com 28% (FAO, 2011). Segundo Cabeda (1983), degradação física do solo pode ser definida como perda de qualidade da sua estrutura, podendo ocorrer tanto em superfície, através do seu encrostamento, quanto em subsuperfície, pelo surgimento de camadas compactadas, descontinuidade dos poros e rompimento dos agregados naturais. A deterioração da estrutura, confere ao solo menor infiltração de água e, consequentemente, maior escoamento superficial e perdas de solo e água.

Segundo Hudson (1995), existem sete categorias de degradação do solo mundialmente estabelecidas que são importantes, a citar: 1) erosão hídrica, 2) erosão eólica, 3) degradação química, 4) degradação física, 5) degradação biológica, 6) salinização e 7) desertificação. Dentre estas categorias de degradação, enfatiza-se a erosão, pois é responsável pela maior parte da degradação, e acima de tudo, dentro da escala de existência humana, o solo é considerado como um recurso natural não renovável, podendo muitas vezes ter suas funções primárias perdidas pelo processo de erosão.

Segundo Portela (2009), as principais causas e consequências da degradação física do solo são: cobertura insuficiente da sua superfície, preparo excessivo e superficial do mesmo, diminuição da atividade microbiana, preparo sob condições inadequadas de umidade do solo, perda da sua matéria orgânica, tendo como consequência, aumento da densidade do solo, diminuição da capacidade de retenção de água e estabilidade de agregados do solo. Tais consequências acarretam em diminuição da capacidade do solo de exercer suas funções, bem como na diminuição da sua qualidade.

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do mesmo de servir uma função dentro dos limites de um ecossistema e de interagir positivamente com o ambiente externo a ele (LARSON & PIERCE, 1991) ou, alternativamente, como o grau de ajustamento de um solo a um uso específico, ou seja, sua habilidade ou capacidade de servir uma função específica (GREGORICH, 2002). Já Brady & Weil (2002) definem qualidade do solo como uma medida da habilidade do solo de realizar funções ecológicas particulares, a qual reflete uma combinação das suas propriedades químicas, físicas e biológicas.

Segundo Gregorich (2002) e Brady & Weill (2002), a junção e combinação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, lhe permite realizar cinco funções principais, as quais eles chamam de funções primárias do solo, ou seja, servindo como: (1) meio de crescimento de plantas e de animais, (2) regulador do suprimento de água, (3) receptor e tamponador de descartes ou contaminantes, (4) *habitat* para organismos do solo e (5) suporte para construções. Gregorich (2002), baseado no seu conceito de qualidade do solo, enfatiza que, primeiramente, com o intuito de desenvolver uma arquitetura de trabalho para a qualidade do solo, faz-se necessário ter a definição e descrição das funções as quais a mesma deve ser baseada, isto é, aquelas que, provavelmente, irão influenciar no desempenho do solo.

Entretanto, vale destacar que a qualidade do solo sofre influência das interações de propriedades naturais, da geologia e dos processos pedogenéticos (argila, minerais, horizonte B textural ou coeso, etc.), e de propriedades dependentes e alteradas pelas práticas de manejo (tipo de uso, manejo e intensidade de preparo da terra) (VOLK, 2006). Neste sentido, as práticas de manejo do solo podem alterar a qualidade do solo, podendo altera-la positivamente, ou piorá-la (SEYBOLT et al., 1999).

Em adição ao estudo de qualidade do solo, vale enfatizar a importância, a compreensão e o discernimento de dois conceitos

de grande relevância para o assunto, que são os de resistência e resiliência. Resistência do solo refere-se à sua capacidade de resistir a mudanças quando confrontado com qualquer tipo de força ou perturbação externa ou, alternativamente, à capacidade do solo de continuar cumprindo integralmente uma ou mais de suas funções após ele ter sido confrontado com alguma força ou perturbação externa (HERRICK & WANDER, 1998). Já resiliência é a capacidade do solo de readquirir sua capacidade plena de cumprir com uma ou mais de duas funções após ter sofrido mudanças ocasionadas por forças externas (SEYBOLD et al., 1999). Resumidamente, resiliência do solo é a sua capacidade de se recompor perante mudanças ou deformações originadas de forças ou perturbações externas.

Em suma, durante uma perturbação por uma força externa, a qualidade do solo é função da sua resistência e, após o período de distúrbio, a qualidade do solo passa a ser dependente da sua resiliência (COGO et al., 2003). Assim, para que o solo apresente uma boa qualidade, seus atributos devem, primordialmente, afetar positivamente na sua resistência e/ou resiliência. Segundo Seybold et al. (1999), as capacidades do solo de resistir e de se recompor podem ser aumentadas ou diminuídas e perdidas pelo manejo do solo.

2.2.1 Avaliação da qualidade do solo por indicadores

O estudo da qualidade do solo, com o intuito de quantificar ou tentar avaliar sua habilidade de desempenhar uma função específica é amplamente pesquisado, sendo feito, normalmente, por meio do desenvolvimento de um índice de qualidade do solo, para cada ecossistema específico (KARLEN & STOTT, 1994; BRADY & WEIL, 2002; COGO et al., 2003). Este índice é obtido ponderando-se cada indicador de qualidade de acordo com a sua importância e relação com a função desejada definida a priori (BRADY & WEIL, 2002). O

somatório dos indicadores assim ponderados dá surgimento ao índice de qualidade do solo (KARLEN & STOTT, 1994).

Segundo Karlen & Stott (1994) e Cogo et al. (2003), definir indicadores de qualidade do solo é uma tarefa muito difícil, sendo resultante da enorme diversidade de propriedades do solo que afetam e que devem ser levadas em consideração, pois, neste sentido, frequentemente, a habilidade ou capacidade de um solo de desempenhar uma função desejada é dependente de um ou mais processos dinâmicos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos ecossistemas de solo.

Dentro do objetivo almejado, o solo deve apresentar algumas funções específicas consideradas essenciais para que o mesmo apresente boa qualidade. Entretanto, muitas vezes, tais funções não podem ser avaliadas diretamente, porém, pode-se medir propriedades específicas que são indicativas das mesmas. Tais propriedades, são denominadas de indicadores de qualidade do solo (LARSON & PIERCE, 1991; GREGORICH, 2002; COGO et al., 2003). Igualmente, por limitações práticas, em alguns casos torna-se impossível medir todas as propriedades do solo para devidamente avaliar sua qualidade. Para estas finalidades, alguns indicadores de qualidade do solo são necessários, desde que os mesmos abranjam a variação integral das suas propriedades físicas, químicas e biológicas ou que reflitam suas funções, e que sejam fáceis de serem medidos por outros usuários e sob as mais variadas condições de campo e respondam a mudanças de clima e de manejo, podendo-se ainda, avaliar seu comportamento temporal (GREGORICH, 2002).

Segundo Larson & Pierce (1991), os indicadores medidos continuamente, podem ser combinados para produzir um índice, ou uma medida geral de qualidade do solo ou uma mudança da qualidade e no tempo, em resposta a alteração provocada pelas práticas de manejo.

A avaliação da qualidade do solo com vistas à minimizar a erosão hídrica pluvial, segundo Karlen & Stott (1994), deve avaliar a sua capacidade de: (1) permitir a livre entrada de água

na sua superfície; (2) permitir o movimento interno da água que entrou na sua superfície; (3) resistir as forças de desagregação física originadas do impacto das gotas da chuva e da ação cisalhante da enxurrada dela originada; e (4) servir de meio para o crescimento de plantas e animais. Assim, um solo que apresente boa qualidade em relação à resistência à erosão hídrica, deve atender a cada um de tais requisitos.

A erosão hídrica pluvial caracteriza-se pelas desagregação, transporte e deposição das partículas de solo para fora da área por forças gravitacionais (HUDSON, 1995) e, sua magnitude, é o produto resultante do poder da chuva em originar erosão e do solo em resistir a ela, havendo condições de superfície e subsuperfície que interferem na capacidade da chuva e do escoamento em causar erosão e os que condicionam ao solo uma maior resistência à erosão (RENARD et al., 1997). Assim, as funções necessárias ao solo para o controle da erosão hídrica pluvial, consiste em dissipar a força de impacto das gotas da chuva, reduzir o volume e a velocidade do escoamento superficial e aumentar a resistência do solo superficial à ação erosiva de tais agentes (COGO et al., 2003).

Atender a estes requisitos é de fundamental importância na redução da erosão hídrica pluvial, uma vez que estas afetam o volume e velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, sua capacidade de transportar partículas de solo desagregadas para fora da área de interesse, como também de desagregar mais solo, pela sua ação cisalhante (SCHWAB et al., 1981).

Dentre as condições de superfície do solo que afetam a erosão hídrica, destacam-se a cobertura do solo por resíduos culturais (PORTELA, 2009 RAMOS et al., 2014), o grau de consolidação da superfície (STRECK, 1999; VOLK et al., 2009; PORTELA, 2009), presença de crosta superficial (DALLA ROSA, 2012), rugosidade superficial (COGO, 1981; ZOLDAN JUNIOR, 2006). Ainda, as condições internas ou de subsuperfície, destacando-se, especialmente, a porosidade total do solo (PORTELA, 2009), macroporosidade do solo pela sua

influência no volume total de enxurrada (BERTOL et al. 2004a), a distribuição dos poros, e a estabilidade de agregados do solo (VOLK, 2006; PORTELA, 2009). Entretanto, vale enfatizar que estas condições de superfície e subsuperfície, influenciam de modo diferente a erosão hídrica pluvial, pois umas afetam mais a diminuição da desagregação e a resistência do solo, e outras a energia e o volume do escoamento.

A presença de resíduos culturais sobre a superfície retarda a formação do selo, pois, a cobertura do solo dissipa a energia cinética das gotas de chuva (BERTOL, et al., 1989), mantendo alta infiltração de água no solo (LOPES et al., 1987a) e diminui o escoamento superficial (COGO, 1981). Segundo Portela (2009), a cobertura do solo explica, por si só, 65 a 85% da variação observada nas perdas de solo, graças à sua grande capacidade de dissipar a energia cinética das gotas de chuva junto à superfície, retardando, porém não evitando a formação da crosta (DALLA ROSA et al., 2013b). Ainda, a cobertura do solo, mesmo que em menor grau, diminui a energia no escoamento superficial pela diminuição da sua velocidade, pois serve como obstáculo mecânico ao livre escoamento.

Já a rugosidade superficial, afeta a erosão hídrica devido o incremento na porosidade interna do solo pelo preparo (ALLMARAS et al., 1966) e, conseqüentemente, a infiltração de água no solo (RÖMKENS & WANG, 1986; ELTZ & NORTON, 1997), o armazenamento interno e as depressões da superfície (CURRENCE & LOVELY, 1970; ALLMARAS et al., 1966). Ainda, a rugosidade superficial do solo reduz a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, sua capacidade de desagregar e transportar o solo (BERTOL et al., 1989; ELTZ & NORTON 1997).

Segundo Schwab et al., (1981) e Karlen & Stott, (1994), as características de sub-superfície que interferem nas funções específicas de resistir à erosão hídrica, destacam-se a textura, o teor de água no solo antecedente as chuvas e as variáveis ligadas

a sua estrutura, como macro, micro e porosidade total e estabilidade de agregados de solo.

O manejo do solo influencia diretamente a sua estrutura, porosidade e estabilidade dos agregados. O cultivo inapropriado aumenta a densidade do solo, reduzindo conseqüentemente a macroporosidade (embora possa aumentar a resistência do solo à desagregação). Ainda, os resíduos culturais incorporados e as raízes das plantas desempenham importante papel no aumento do teor de matéria orgânica no solo (VOLK & COGO, 2009), contribuindo para a formação de agregados estáveis, graças à ação cimentante e aglutinante da matéria orgânica (BRANDÃO & SILVA, 2012).

Para Ingaramo (2003), as principais propriedades e fatores físicos do solo adequados para descrever a sua qualidade são: porosidade, distribuição de tamanho de poros, densidade do solo, resistência mecânica à penetração de raízes, condutividade hidráulica, distribuição de tamanho de partículas e profundidade do desenvolvimento radicular das plantas.

Segundo Portela (2009), as condições físicas internas do solo, ou de subsuperfície, em sua essência, afetam a erosão hídrica de forma indireta, mas sendo de igual importância, pois estas propriedades afetam a infiltração de água no solo e, indiretamente, o volume do escoamento superficial e conseqüentemente as perdas de solo. Neste ponto, destacam-se a porosidade do solo, juntamente com a distribuição e a continuidade dos poros, bem como a estabilidade dos agregados. Neste quesito, quanto maior a porosidade total, volume de macroporos e maior for a estabilidade de agregados (responsável por manter a qualidade do espaço poroso), maior será a infiltração de água no solo, e menores serão as perdas de solo e água. Já a densidade do solo, massa de raízes, bem como a estabilidade de agregados afetam diretamente à resistência do solo à desagregação, pois faz com que haja um menor desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva

ou pelo escoamento superficial concentrado (ANGULO et al., 1984; ROTH & HAAS, 1989; DE BAETS & POLSEN, 2010).

Streck (1999) correlacionou o efeito da reconsolidação do solo sobre a erosão hídrica, concluindo que após 2,5 anos sem preparar o solo, com e sem o seu cultivo, as perdas de solo foram reduzidas em 81% e 93%, respectivamente, concordando com Renard et al. (1997) (porém com um efeito de reconsolidação mais rápido do que este autor) e Volk (2006). Volk (2006) observou um efeito benéfico das diferentes sequências de cultivos do solo na erosão hídrica, pois estas afetavam diferentemente as condições físicas do solo de superfície e subsuperfície antes e após o seu preparo. O referido autor, encontrou ainda, que a massa de raízes, o diâmetro médio ponderado dos agregados em água, a cobertura do solo por resíduos culturais e a rugosidade superficial do solo mostraram-se bons indicadores de qualidade física para o propósito de redução das perdas de água e solo.

Portela (2009) encontrou maior influência das condições físicas externas ou superficiais do solo que das físicas internas ou subsuperficiais naturais para as variáveis de erosão hídrica. O referido autor conclui, ainda, que a quantidade de biomassa subterrânea ou raízes, a macroporosidade do solo, o diâmetro médio ponderado de agregados do solo em água e a percentagem de estabilidade em água de agregados do solo maiores do que 0,5 mm são bons indicadores de qualidade física do solo com a finalidade de melhorar a infiltração de água e reduzir a erosão hídrica.

2.2.2 Indicadores de qualidade do solo para a sua função de resistir à erosão hídrica

Com a finalidade de desenvolver índices e pesos que sirvam de indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica, poucos trabalhos existem, dentre os quais os de Karlen & Stott (1994) (Tabela 1) e Cogo et al. (2003) (Tabela

2). Com o intuito de nortear o presente estudo e de estudos futuros de qualidade do solo, serão ponderadas as propostas existentes (KARLEN & STOTT, 1994 e COGO et al., 2003) direcionadas para conservação do solo, afim de extrair destas, os pontos positivos e negativos.

Karlen & Stott (1994) desenvolveram um índice quantitativo de qualidade do solo em relação à erosão hídrica pluvial por meio de medições subjetivas, qualitativas e quantitativas de todos os atributos físicos e químicos que os referidos autores julgaram apropriados (Tabela 1). Estes autores destacam que muitas outras combinações de atributos do solo são possíveis, já que os indicadores escolhidos para avaliar uma função específica podem diferir de acordo com as características edafoclimáticas da região para a qual a qualidade do solo está sendo sugerida e do tipo de erosão predominante no local.

Analisando a proposta de Karlen & Stott (1994) (Tabela 1), verifica-se que os autores, consideram que as qualidades imprescindíveis que o solo deve apresentar para resistir à erosão são: (1) facilitar a entrada de água no solo; (2) facilitar o transporte e o armazenamento de água no seu interior; (3) resistir à degradação física e; (4) sustentar o crescimento de plantas. Nessa proposta, os possíveis indicadores de qualidade do solo foram identificados em três níveis, para cada uma das funções especificadas. Dentro de cada nível da qualidade do solo, pesos relativos foram atribuídos a cada indicador, os quais refletiam sua importância relativa no desempenho da função específica. Os autores demonstraram que os escores (variando de 0 a 1) e os pesos individuais foram multiplicados e seus produtos somados, de modo a resultar um valor numérico global de qualidade do solo.

Na proposta de Karlen & Stott (1994), a infiltração de água, condutividade hidráulica, estabilidade de agregados e resistência ao cisalhamento estavam entre os indicadores físicos de qualidade do solo mais críticos em relação à erosão hídrica causada pela água da chuva. Propriedades dinâmicas do solo,

tais como densidade, características químicas incluindo disponibilidade de nutrientes e acidez, condutividade elétrica e salinidade, foram consideradas importantes para a função de crescimento de plantas. Entretanto, o teor de matéria orgânica (carbono orgânico) e a mineralogia, importantes em relação à formação e à estabilidade dos agregados de solo (BERTOL et al. 2006; ROTH & HAAS, 1989), foram consideradas de menor importância. Assim, os autores julgaram de maior importância as propriedades do solo que afetavam o volume de enxurrada, em detrimento àquelas que interferiam na resistência do solo à erosão e, igualmente, que interferiam na sua resiliência.

Ainda, na proposta de Karlen & Stott (1994), a cobertura por resíduos culturais e a rugosidade superficial estavam presentes como indicadores somente na função específica de facilitação da entrada de água no solo (segundo nível), e a massa de resíduos culturais totalmente ausente. Desta forma, a principal limitação, e conseqüentemente ponto a ser alterado, é a importância relativa da cobertura do solo por resíduos culturais, da rugosidade superficial do solo e da estabilidade de agregados. Trabalhos tais como os de Dechen et al. (1981), Angulo et al. (1984), Lopes et al. (1987b), Roth & Haas (1989) Cassol et al. (2004), Bertol et al. (2006) Zoldan Junior et al (2008), Luciano et al. (2009), Volk e Cogo (2009), De Baets & Poesen (2010) e Ramos et al. (2014), demonstraram a importância da cobertura do solo, da rugosidade superficial e/ou da estabilidade de agregados sobre a erosão hídrica.

Tabela 1 - Funções específicas e indicadores de qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica. (continua)

Função específica	Peso	Nível I	Peso	Nível II	Peso	Nível III	Peso
Facilitar a entrada de água no solo através da sua superfície	0,50	Taxa de infiltração	1,00	Crosta superficial		Textura	0,50
					0,20	Espessura	0,20
						Resistência	0,20
						Taxa de formação	0,10
				Rugosidade superficial do solo	0,20		
				Cobertura por resíduos culturais	0,50		
				Macroporos	0,10	Massa de raízes	0,40
						Minhocas	0,60
Facilitar o movimento e o armazenamento da água no interior do solo	0,10	Condutividade hidráulica	0,60	Textura do solo	0,50		
				Teor de água capilar	0,30		
				Densidade do solo	0,20		
		Porosidade total	0,15				
		Macroporos	0,25	Massa de raízes	0,40		
Resistir à degradação Física	0,35	Estabilidade de Agregados	0,80	Minhocas	0,60		
				Mineralogia	0,20	Ligantes físicos	0,50
						Ligantes químicos	0,50
				Carboidratos do solo	0,35	C orgânico lábil	0,60
						C orgânico recalcitrante	0,40
				Biomassa microbiana	0,30	Hífas de fungos	0,50

Tabela 1 - Funções específicas e indicadores de qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica. (conclusão)

Função específica	Peso	Nível I	Peso	Nível II	Peso	Nível III	Peso
						Actinomicetos	0,30
						Bactérias	0,20
				Cátions disponíveis	0,15		
		Resistência ao cisalhamento	0,10				
		Textura do solo	0,05				
		Capacidade de transferência de calor	0,05				
		Profundidade de enraizamento	0,25	Profundidade da camada restritiva	0,70		
				Textura do solo	0,30		
				Capacidade de água disponível	0,70		
		Relações de água	0,35	Drenagem	0,20		
				C orgânico	0,10		
				pH	0,15		
				C orgânico	0,25		
Sustentar o crescimento de plantas	0,05					N	0,50
		Relações de Nutrientes	0,30	Macronutrientes	0,40	P	0,25
						K	0,25
				Ca, Mg e S	0,10		
				B, Cu, Fe, Mn, Zn	0,10		
				Salinidade	0,50		
		Barreiras químicas	0,10	Metais pesados	0,15		
				Orgânicos	0,25		
				Radioativos	0,10		

Fonte: Karlen & Stott (1994)

Em contrapartida à sugestão proposta por Karlen & Stott (1994), Cogo et al. (2003) propuseram que as características de superfície do solo, tais como a percentagem de cobertura e

quantidade (massa) de resíduos culturais sejam utilizadas como indicadores de qualidade de primeira ordem para a função principal de resistir à erosão hídrica pela água da chuva, mesmo sendo atributos externos ao solo (Tabela 2). Igualmente, os autores sugeriram que seja atribuído maior peso relativo à rugosidade superficial na sua influência sobre a entrada de água no solo. Cogo et al. (2003) propuseram considerar a cobertura do solo e a quantidade de resíduos culturais presentes como funções de resistência do solo à degradação física, de facilitação da entrada de água no solo e de obstaculização do livre movimento do escoamento superficial. Ainda, sugeriram adicionar a rugosidade superficial nas funções de facilitar a entrada de água através da superfície e de obstaculização do livre movimento do escoamento superficial.

Ainda na proposta sugerida por Cogo et al. (2003) (Tabela 2), os autores sugeriram uma modificação na proposta original de Karlen & Stott (1994). As funções específicas que um solo deve apresentar para resistir à erosão hídrica, segundo aqueles autores, deveriam ser: (1) resistir à degradação física por ação de impacto das gotas da chuva; (2) facilitar a entrada de água no solo através da sua superfície (reduzir o volume do escoamento superficial); (3) obstaculizar o movimento/resistir à degradação física por ação de cisalhamento do escoamento superficial (reduzir a velocidade do mesmo) e; (4) facilitar o transporte e o armazenamento internos da água. Assim, Cogo et al. (2003) sugeriram introduzir a função específica de obstaculização do livre movimento do escoamento superficial (redução de velocidade do mesmo). Ainda, subdividiram as funções somente em dois níveis categóricos e condicionaram a resistência do solo à degradação física com um peso maior.

Então segundo estes autores, as propriedades do solo que afetam o volume da enxurrada são mais importantes. Provavelmente, os solos estudados por Karlen & Stott (1994), apresentavam, na sua grande maioria, maior suscetibilidade à erosão hídrica do que os estudados por Cogo et al. (2003), consequência dos seus constituintes químicos e físicos, o que tornava necessariamente a diminuição do volume de enxurrada distintos.

Considerando o que foi exposto e assumindo que a proposta de Cogo et al. (2003) é mais específica em relação à erosão hídrica, julga-se tal proposta mais coerente e aplicável do que a de Karlen & Stott (1994). Contribui para esta decisão o fato que a proposta de Cogo et al. (2003), com apenas dois níveis categóricos de indicadores, é mais simples do que a dos outros autores, o que torna mais sucinta, de mais fácil obtenção à campo e acompanhamento temporal, requisitos importantes para indicadores de qualidade do solo (GREGORICH, 2002).

Desta forma, o presente trabalho almeja avaliar e determinar indicadores de qualidade do solo para erosão hídrica, com base nos trabalhos supracitados e, seguindo a estrutura proposta por Cogo et al. (2003), com algumas alterações de acordo com o obtido à campo.

Tabela 2 - Sugestão de nova forma de consideração da qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica causada pela água da chuva.

(continua)

Função específica de qualidade do solo	Peso relativo na função principal	Indicador de qualidade do solo	Peso relativo na função específica	Indicador de qualidade do solo	Peso relativo na função específica
		Nível I		Nível II	
		Percentagem de cobertura por resíduos culturais	30		
				Textura	6,0
				Tipo do mineral de argila	2,5
				Argila dispersa em água	1,5
1. Resistir à degradação física por ação de impacto das gotas da chuva	45	Resistência ao cisalhamento por impacto das gotas da chuva	10		
				Textura	2,5
				Tipo do mineral de argila	1,0
				Teor de matéria orgânica	1,0
				Biomassa microbiana	0,5
		Estabilidade dos agregados em água	5,0		
2. Facilitar a entrada de água no solo através da sua superfície (reduzir o volume do escoamento superficial)	35	Capacidade de infiltração de água	25		
				Textura	8,0
				Rugosidade superficial ao acaso	8,0
				Selo/crosta superficial	4,0
				Macroporos	3,0
				Tipo do mineral de argila	2,0

Tabela 2 - Sugestão de nova forma de consideração da qualidade do solo para a sua função principal de resistir à erosão hídrica causada pela água da chuva.

(conclusão)					
Função específica de qualidade do solo	Peso relativo na função principal	Indicador de qualidade do solo	Peso relativo na função específica	Indicador de qualidade do solo	Peso relativo na função específica
Nível I			Nível II		
3. Obstaculizar o movimento/resistir à degradação física por ação de cisalhamento do escoamento superficial (reduzir a velocidade do mesmo)	10	Porcentagem de cobertura por resíduos culturais	10	Massa de resíduos culturais	10
		Rugosidade superficial do solo ao acaso	5,0		
		Quantidade de resíduos culturais superficiais	5,0		
4. Facilitar o transporte e o armazenamento internos da água	10	Condutividade hidráulica	6,0	Textura	2,5
				Teor de água capilar	1,5
				Tipo do mineral de argila	1,0
		Porosidade total	1,5	Densidade do solo	1,0
				Raízes de plantas	1,5
		Macroporos	2,5	Minhocas	1,0

Fonte: Cogo et al. (2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida em Lages, SC, em área localizada no Centro de Ciências Agroveterinárias, campus da Universidade do Estado de Santa Catarina, em coordenadas 27° 47' latitude Sul e 50° 18' longitude Oeste de Greenwich. O clima da região é do tipo Cfb (subtropical úmido, chuvoso e com verões frescos) segundo a classificação de Köppen e, a precipitação pluvial média anual, segundo Schick et al. (2014b) é de 1.533 mm no local. O relevo da área experimental é suave-ondulado, com altitude aproximada de 900 metros, e declividade média de 0,134 m m⁻¹, variando de 0,124 m m⁻¹ a 0,145 m m⁻¹.

3.1.1 Solo

O solo da área experimental é um Cambissolo Húmico alumínico léptico (Inceptisol), com granulometria de 196 g kg⁻¹ de areia, 412 g kg⁻¹ de silte e 392 g kg⁻¹ de argila (classe textural franco-argilossiltosa), conforme segue a caracterização da área experimental (Tabela 3), realizada após o preparo das parcelas e implantação dos experimentos, imediatamente antes de serem aplicados os testes de chuva simulada. A tolerância de perda de solo para um Cambissolo Húmico é de 0,74 mm ano⁻¹ (BERTOL & ALMEIDA, 2000) e sua erodibilidade é de 0,0175 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (SCHICK et al., 2014a).

Tabela 3 - Caracterização da área: teor de areia (AR), silte (SI) e argila (AG), carbono orgânico total (COT), densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP), porosidade total (PT), macroporos (MAP), microporos (MIP) e estabilidade dos agregados em água (DMG), para as profundidades de 0 – 0,025; 0,025 – 0,05; 0,05 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m (média das repetições).

Tratamento	Profundidade m	AR g kg ⁻¹	SI g kg ⁻¹	AG g kg ⁻¹	COT g kg ⁻¹	DS g dm ⁻³	DP g dm ⁻³	PT m ³ m ⁻³	MIP m ³ m ⁻³	MAP mm	DMG mm
SRA	0 – 0,025	190	420	390	3,09	1,07	2,45	58	36	22	4,85
	0,025 – 0,05	186	418	396	2,72	1,08	2,45	55	35	20	4,37
	0,05 – 0,10	189	413	398	2,49	1,35	2,38	50	44	6	6,19
	0,1 – 0,2	172	421	407	2,62	1,31	2,41	48	44	4	5,87
SRE	0 – 0,025	238	414	348	3,08	1,07	2,38	56	31	25	5,44
	0,025 – 0,05	181	429	390	2,94	1,42	2,40	50	42	8	5,39
	0,05 – 0,10	174	412	414	2,83	1,39	2,31	51	43	8	6,44
	0,1 – 0,2	184	383	433	2,57	1,35	2,53	50	44	6	5,71
SEA	0 – 0,025	227	425	348	2,98	1,23	2,35	51	40	11	5,97
	0,025 – 0,05	211	415	374	2,81	1,33	2,37	50	41	9	5,80
	0,05 – 0,10	207	417	376	2,52	1,33	2,47	50	43	7	6,23
	0,1 – 0,2	202	411	387	2,54	1,31	2,46	51	46	5	6,14
SEE	0 – 0,025	206	425	369	2,67	1,21	2,50	52	36	16	5,11
	0,025 – 0,05	192	410	398	2,55	1,43	2,51	48	40	8	6,11
	0,05 – 0,10	198	436	366	2,50	1,35	2,47	48	40	8	5,74
	0,1 – 0,2	198	431	371	2,21	1,35	2,51	49	43	6	5,15
SDE	0 – 0,025	151	427	422	2,29	1,07	2,53	59	35	24	5,71
	0,025 – 0,05	207	376	417	2,37	1,05	2,49	59	34	25	6,00
	0,05 – 0,10	206	377	417	2,38	1,22	2,54	53	44	9	5,77
	0,1 – 0,2	207	373	420	2,49	1,19	2,59	54	46	8	5,57

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Unidade experimental

A unidade experimental, ou parcela, apresentava dimensões de 11 m de comprimento por 3,5 m de largura (IAPAR, 1975), com a disposição do comprimento da parcela no sentido do declive. A parcela era delimitada nas suas laterais e na extremidade superior por chapas galvanizadas de 0,2 m de altura, cravadas 0,1 m no solo, com o intuito de evitar perda da enxurrada, ou que houvesse entrada da mesma das áreas circunvizinhas. A extremidade inferior da parcela era delimitada e composta por uma calha coletora, conectada a um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, cuja função era direcionar o fluxo do escoamento até uma trincheira onde se realizavam as medições e coletas da enxurrada.

A disposição de cada uma das parcelas na área, juntamente com o sentido da locação, havia sido definida em experimentos anteriores com a ajuda de um nível de precisão, demarcando curvas de nível de mesma cota nas extremidades de cada parcela, diminuindo assim a possibilidade de escoamentos laterais.

3.1.2 Histórico da área experimental

A área experimental era composta por campo natural e passou a ser utilizada em trabalhos de erosão hídrica em 2006, onde se realizou a correção de sua acidez, incorporando o calcário com duas arações e duas gradagens, conforme descrito em Barbosa et al. (2009). Na safra de inverno de 2006 quando fez-se o primeiro trabalho, a área foi cultivada com ervilhaca (*Vicia sativa*) e aveia preta (*Avena strigosa*), sendo cultivada, posteriormente, com várias culturas, para sua manutenção. Na safra de verão 2009/2010 a área foi novamente usada para fins de pesquisa, quando cultivou-se milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), feijão (*Plaseolus vulgaris*) e consórcio de milho e feijão. Já na safra de inverno de 2010, a área recebeu a cultura do trigo

(*Triticum aestivum*) e, no cultivo que antecedeu a implantação deste experimento (safra de verão 2010/2011), foi cultivada com soja e milho, semeados no sentido e perpendicular ao declive (MARIOTI et al., 2013). Desde a safra de verão 2009/2010, as parcelas descobertas foram mantidas sem cultura, não havendo interferência alguma de sistemas radiculares ou resíduos culturais.

3.2 TRATAMENTOS

A implantação dos tratamentos foi iniciada logo após o término de outro trabalho de erosão hídrica na área, em que se estudaram as culturas do milho e da soja semeadas no sentido do declive e paralelo ao declive, bem como parcelas descobertas sem cultivo (MARIOTI, 2012). Após o término deste experimento, em maio de 2011, retiraram-se os resíduos culturais das culturas anteriores e eliminaram-se as plantas espontâneas que ali haviam e, em seguida, foi feito o sorteio dos tratamentos, com exceção do tratamento sem cultivo, onde o solo deveria estar sem cultivo e sem influência de resíduos e raízes culturais por um período superior a dois anos.

Após o sorteio, foi realizada a semeadura das culturas de forma manual e a lanço e, juntamente, foi aplicada uma adubação de base com a formulação 7-30-15 (N-P₂O₅-K₂O), na dose de 300 kg ha⁻¹. Para a cultura do azevém, semeou-se 40 kg ha⁻¹ e, para a ervilhaca, 60 kg ha⁻¹ de sementes. Para a incorporação das sementes fez-se uma gradagem leve, suficiente apenas para garantir melhor germinação. A gradagem foi feita no sentido transversal ao declive sendo realizada apenas uma vez por parcela. Após 40 dias da semeadura, aplicou-se uma adubação nitrogenada para a cultura do azevém, na dose de 40 kg ha⁻¹ de N. Já para a ervilhaca, retardou-se esta aplicação mais 30 dias, pois a cultura se desenvolveu mais lentamente, não tendo capacidade de aproveitar ou assimilar o N solúvel aplicado.

A limpeza do solo na área das parcelas ao longo do experimento consistiu de arranque manual e aplicação de herbicidas, quando necessário. Após as culturas terem alcançado a plena floração, realizou-se a roçada das plantas. A cultura do azevém já havia iniciado a senescência no momento da preparação da área; na ervilhaca teve que se realizar um corte com uma foice para induzir sua morte, pois as mesmas encontravam-se em os estágio de floração e enchimento de grãos. Após cortadas às plantas, retiraram-se a parte aérea dos resíduos da superfície das parcelas para implantar-se os tratamentos sem resíduo, conforme pode-se visualizar na Figura 1.

Figura 1 - Visualização da superfície do solo antes da escarificação no tratamento solo cultivado e escarificado contendo apenas as raízes da cultura de azevém (SEA).



Fonte: Próprio autor.

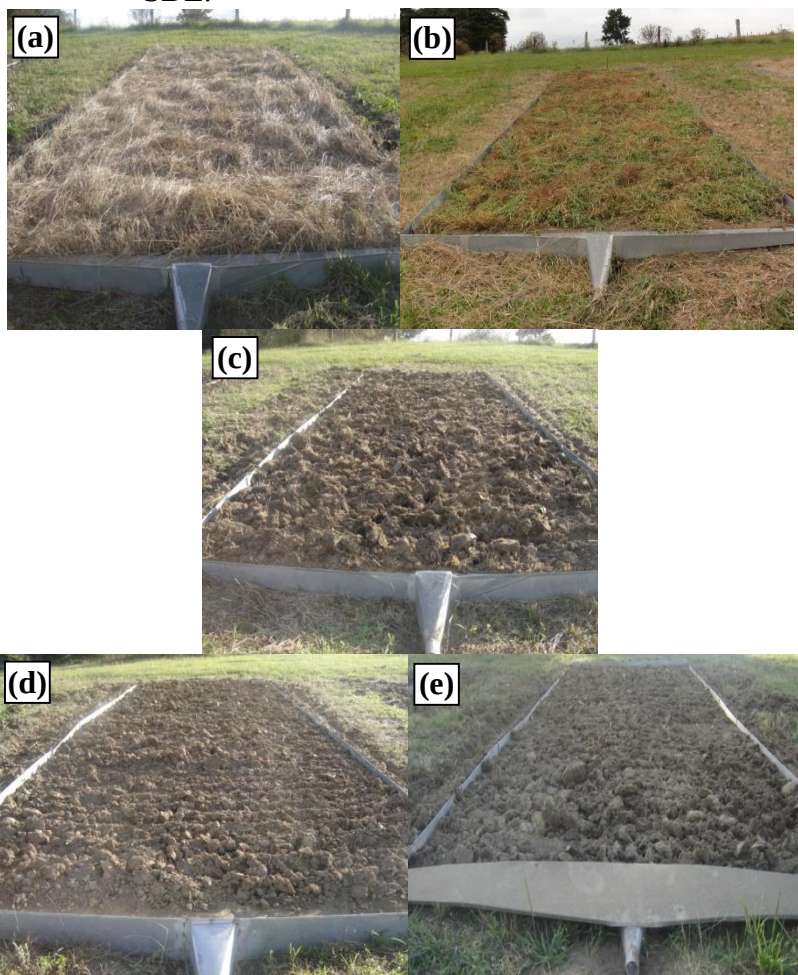
O experimento foi composto por cinco tratamentos, com duas repetições de campo, totalizando dez parcelas experimentais. Comparou-se a influência de duas culturas, tanto da cobertura dos seus resíduos mantidos sobre o solo, quanto do seu sistema radicular no solo escarificado sem os resíduos na superfície, e ainda, da ausência de resíduo, e de raízes em solo escarificado, conforme a seguinte descrição: i) cultivo de

azevém (*Lolium multiflorum*), sem preparo do solo, com o resíduo cultural totalmente mantido na superfície e a rugosidade mínima (SRA) (Figura 2a); ii) cultivo de ervilhaca (*Vicia sativa*), sem preparo do solo, com o resíduo cultural totalmente mantido na superfície e rugosidade mínima (SRE) (Figura 2b). Nestes dois tratamentos, a rugosidade mínima era remanescente de uma gradagem leve realizada no ato da semeadura da cultura para incorporação das sementes; iii) cultivo de azevém em que o resíduo cultural foi totalmente removido da superfície mantendo-se apenas as soqueiras e raízes da cultura e o solo foi preparado com uma escarificação (SEA) (Figura 2c); iv) cultivo de ervilhaca, em que o resíduo cultural foi totalmente removido da superfície mantendo-se apenas as soqueiras e raízes da cultura e o solo foi preparado com uma escarificação (SEE) (Figura 2d); v) solo sem cultivo e sem resíduo cultural, assim mantido desde 2009 e preparado com uma escarificação realizada do mesmo modo como em SEA e SEE (SDE) (Figura 2e).

Nos tratamentos SEA e SEE, as culturas foram roçadas na plena floração para a retirada dos resíduos e a operação de escarificação foi realizada, inclusive no SDE, em 13 de dezembro de 2011.

A escarificação dos tratamentos SEA, SEE e SDE foi realizada 4 dias antes do teste 1 de chuva simulada. Por este motivo, as parcelas foram cobertas até a realização da chuva simulada para protegê-las de chuvas naturais que poderiam interferir na rugosidade superficial dos tratamentos. A escarificação foi realizada transversalmente ao declive, utilizando-se um escarificador que continha duas linhas de hastes desencontradas, uma dianteira com sete hastes e outra traseira com seis hastes, com distância de 0,5 m entre elas. Assim, a escarificação gerou sulcos distanciados 0,25 m entre si, com profundidade de 0,15 m, ocasionando rugosidade alta.

Figura 2 - Visualização individual de cada tratamento estudado, onde (a); SRA (b): SRE; (c): SEA; (d): SEE e; (e): SDE.



Fonte: Próprio autor.

3.3 SIMULADOR DE CHUVA E CHUVAS SIMULADAS

Para a aplicação das chuvas, em número de oito por tratamento, utilizou-se um aparelho simulador de chuva de braços rotativos tipo empuxo, cuja movimentação dos braços era feita pela ação da água (BERTOL et al., 2012), o qual cobria simultaneamente duas parcelas experimentais, espaçadas entre si 3,5 m (Figura 3). O aparelho é composto por 10 braços de 7,5 m de comprimento cada um, ligados a uma torre central a 2,4 m de altura, cobrindo uma área de aproximadamente 300 m². Os 10 braços do simulador continham 30 aspersores do tipo VEJEET 80/100 (MEYER, 1958), dispostos de maneira a formar uma espiral concêntrica perfeita.

Para a aplicação da intensidade planejada de 65 mm h⁻¹, utilizaram-se 15 aspersores abertos, sob pressão de 41,4 kPa, controlada manualmente por meio de um registro próximo ao manômetro, localizado a aproximadamente 6 metros da entrada de água do simulador de chuva, seguindo o procedimento de calibração realizado por Bertol et al. (2012).

O bombeamento da água fez-se por uma bomba estacionária a diesel de 10.297 W. A água provinha de um açude localizado a 50 m do experimento, sendo esta conduzida até o simulador por uma linha de canos de engate rápido de 75 mm de diâmetro.

Em cada tratamento foram aplicadas oito chuvas simuladas com duração de 90 minutos cada uma e intensidade constante, planejada para 65 mm h⁻¹. O conjunto das chuvas aplicadas nos cinco tratamentos constituía-se de um teste em cada aplicação. Assim, oito testes foram aplicados, em épocas diferentes, cada um com cinco chuvas (uma em cada tratamento). A primeira chuva, realizada logo após o preparo das parcelas, foi aplicada no dia 17 de dezembro de 2011 e, os demais, aplicados respectivamente em 10/01/2012, 07/02/2012, 10/03/2012, 11/05/2012, 18/08/2012, 02/11/2012 e 18/12/2012, perfazendo, um ano entre o teste 1 e o teste 8. Os intervalos

foram de 24 dias entre o teste 1 e o teste 2 e de 28, 32, 62, 99, 76 e 46 dias entre cada dois dos demais testes de chuva simulada, respectivamente, correspondendo a 24 52, 84 146, 245, 321 e 367 dias após o teste 1 (tempo 0).

Os intervalos dos quatro primeiros testes de chuva simulada inicialmente foram menores, pelo motivo de que estes compunham um projeto do mestrado. Após o término do mestrado, se continuou o projeto com os mesmos tratamentos, e espaçou-se mais os demais testes para perfazer um ano entre o primeiro e o último teste de chuva e, as variações temporais entre um teste e outro, também sofreu influência das condições climáticas, que muitas vezes não permitiam a execução dos mesmos.

Figura 3 - Simulador de chuva tipo empuxo, cobrindo simultaneamente duas parcelas experimentais.



Fonte: Próprio autor.

3.4 DETERMINAÇÕES REALIZADAS NO SOLO ANTES DE CADA CHUVA SIMULADA

3.4.1 Amostras do solo para análises físicas e químicas

As coletas de amostras do solo para a caracterização realizadas imediatamente antes da implantação do experimento, fizeram-se nas camadas de 0-0,025; 0,025-0,05; 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, enquanto que para o acompanhamento das condições físicas de superfície durante o período experimental, foram coletadas imediatamente antes de cada teste de chuva simulada e somente na camada de 0,0-0,025 m. As amostras foram divididas em dois grupos: indeformadas para determinação da densidade do solo e volume de poros (macroporos, microporos e porosidade total); e deformadas para a determinação da granulometria (textura), densidade de partículas, carbono orgânico total e estabilidade de agregados em água. A coleta das amostras deformadas fez-se com uma espátula e com o auxílio de uma trena para determinar a profundidade de coleta.

Para a porosidade e densidade do solo, foram utilizados anéis metálicos com bordas cortantes; para as camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m, anéis com 0,025 m de altura por 0,06 m de diâmetro, e para as camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, anéis com 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro. A coleta dos anéis foram feitas introduzindo o anel no solo com o auxílio de um batedor de metal com o diâmetro do anel, evitando que as amostras sejam deformadas e/ou compactadas, retirando a amostra do solo com o auxílio de uma espátula, envolvendo a amostra coletada posteriormente em papel alumínio para conservar a umidade.

3.4.2 Rugosidade superficial do solo

As leituras da rugosidade superficial do solo foram feitas imediatamente antes e após a escarificação das parcelas, antes de cada chuva simulada e ao final da última chuva simulada. As leituras foram feitas em um ponto intermediário da parcela, com o rugosímetro posicionado próximo da lateral da parcela, sobre suportes de madeira cravadas no solo que servia de base,

permitindo que as leituras fossem feitas sempre em nível, e à mesma altura em relação ao nível do terreno e no mesmo local.

Para as leituras do microrrelevo, foi utilizado um rugosímetro de varetas (Figura 4), conforme descrito por Correa et al. (2012), no qual a visualização das varetas era feita através de uma câmera fotográfica acoplada ao rugosímetro. Essa metodologia de obtenção se baseia no registro fotográfico de um conjunto de 20 varetas espaçadas entre si 30 mm, e que estão em contato com a superfície do solo e que representam, em sua extremidade superior, o microrrelevo do terreno onde as referidas varetas estão em contato. Assim, fotos registram a altura dessas varetas em relação a uma linha de referência situada abaixo do aparelho. Foram tiradas vinte fotos em diferentes posições, permitindo a maior representação da rugosidade. A interpretação da rugosidade é baseada na análise das imagens conforme proposto por Liñares e Castro (1998).

Figura 4 - Rugosímetro de varetas de alumínio posicionado sobre os suportes de madeira sobre a parcela experimental.



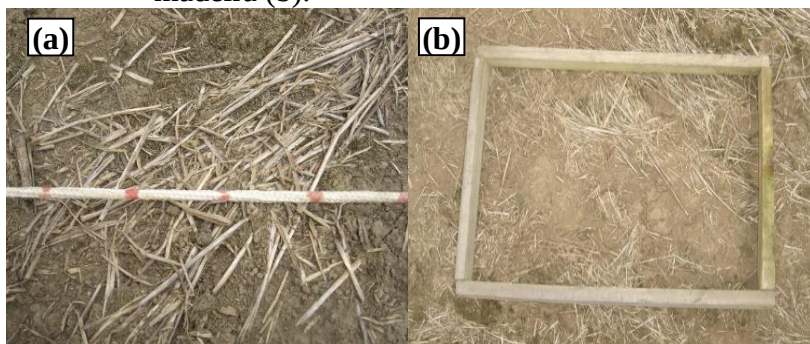
Fonte: Próprio autor.

3.4.3 Cobertura do solo e massa de resíduos culturais

Determinou-se a cobertura do solo por resíduos culturais antes de cada chuva simulada, por meio do método da corda marcada, descrita por Sloneker & Moldenhauer (1977). O método consiste na utilização de uma corda de 5 m de comprimento, com marcações a cada 0,05 m, totalizando assim, 100 pontos (Figura 5a). A corda era estendida sobre o solo, contabilizando-se os pontos marcados que, perpendicularmente, coincidiam com uma peça de resíduo na superfície do solo. Desta forma, a porcentagem de cobertura do solo correspondia à média de duas repetições do número total de pontos que sobrepunham o resíduo na superfície. Devido à presença de resíduos remanescente sobre o solo nos tratamentos escarificados (SEA e SEE), a cobertura do solo foi determinada também nos tratamentos escarificados onde mantiveram-se apenas as soqueiras e raízes das culturas.

A massa de matéria seca dos resíduos, imediatamente antes de cada chuva simulada foi determinada apenas nos tratamentos SRA e SRE, utilizando um retângulo de madeira de 0,6 x 0,4 m ($0,24 \text{ m}^2$), coletando-se em uma única posição escolhida aleatoriamente dentro da parcela (Figura 5b). Os resíduos foram secos em estufa a 50°C e pesados, extrapolando-se o valor para um hectare.

Figura 5 - Visualização da determinação da porcentagem de cobertura do solo pelo método da corda marcada (a), e da massa de resíduos com o uso do retângulo de madeira (b).



Fonte: Próprio autor.

3.4.4 Teor inicial de água no solo

Imediatamente antes de iniciar as chuvas simuladas, foram coletadas amostras de solo deformadas para determinação do teor de água, nas camadas de 0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m de profundidade. As amostras foram coletadas com um trado holandês, em apenas um ponto por parcela, já que o alcance da dependência espacial desta variável é superior à área da parcela (LIBARDI et al.,1986). O teor de água no solo foi calculado na base gravimétrica, conforme a fórmula a seguir:

$$Ug = (mSU - mSS) mSS^{-1} \quad [3]$$

Onde:

Ug = umidade gravimétrica ($m^3 m^{-3}$);

mSU = massa de solo úmido (kg) e;

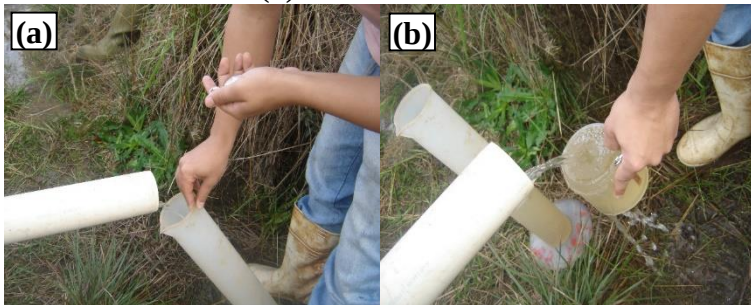
mSS = massa de solo seco (kg).

3.5 DETERMINAÇÕES REALIZADAS DURANTE A CHUVA SIMULADA

3.5.1 Taxa de enxurrada

Para a determinação da taxa instantânea de enxurrada e consequente perda de solo e água seguiu-se a metodologia descrita em Cogo (1981). Após a identificação do início do escoamento, com uma proveta graduada de 2 L coletava-se um volume da enxurrada, marcando o tempo necessário para a coleta de tal volume (Figura 6a), podendo-se assim determinar o escoamento, em L s^{-1} ou em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. As coletas para determinação do volume de enxurrada foram realizadas a cada 5 minutos, coletando-se o maior volume possível, objetivando aumentar a precisão da coleta e, quando o fluxo era demasiado, utilizava-se um balde graduado com capacidade de 15 L, ao invés da proveta. Neste mesmo momento, coletava-se um pote de 0,75 L com o intuito de determinar a concentração de sedimentos e de água na enxurrada (Figura 6b), para o posterior cálculo das perdas de solo e água.

Figura 6 - Visualização das coletas realizadas em campo para determinação do volume da enxurrada (a), e para determinação da concentração de sedimentos na enxurrada (b).



Fonte: Próprio autor.

3.5.2 Velocidade de escoamento

A velocidade de escoamento foi medida quando a taxa de enxurrada era constante, aos 70 minutos de início da chuva simulada, conforme metodologia descrita em Cogo (1981) e Bertol (1995). Foram demarcados com estacas os 6 m centrais das parcelas (2,5 m acima e 2,5 m abaixo das extremidades das parcelas). Na extremidade superior dos 6 m jogava-se o corante azul de metileno (2%) e se cronometrava o tempo necessário para que ele percorresse até a extremidade inferior dos 6 m.

3.5.3 Índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada

As coletas para determinação do diâmetro mediano dos sedimentos (índice D_{50}) transportados pela enxurrada fez-se conforme recomendações descritas em Cogo et al. (1983). As amostras de enxurrada foram coletadas no momento em que a vazão do escoamento superficial encontrava-se sob taxa constante, aos 80 minutos de duração de cada chuva simulada, pois nesse momento, a taxa de erosão não era influenciada pela variação da taxa de descarga (BARBOSA et al., 2010).

Para determinar o D_{50} em campo utilizou-se um conjunto de peneiras com aberturas de malha de 4,75; 2; 1; e 0,25 mm. Nessa ordem, estas peneiras foram colocadas sobre um balde com capacidade para 2 L e, posicionando, o conjunto todo sob o fluxo até o completo preenchimento do referido recipiente. Em seguida, com a ajuda de um pisete, transferiam-se os agregados retidos em cada peneiras para potes plásticos que, ao final do teste, eram levados para o laboratório.

3.5.4 Volume e intensidade de chuva

O volume e a intensidade das chuvas simuladas aplicadas foram quantificados usando-se 20 pluviômetros dispostos ao redor das parcelas, dentro da área de molhamento do simulador

de chuva, seguindo a calibração e recomendação de Bertol et al. (2012). Cada pluviômetro tinha área de captação de 53,85 cm². As leituras dos pluviômetros foram feitas imediatamente após o término dos 90 minutos de chuva, utilizando uma proveta graduada com volume de 1 L.

3.6 PROCEDIMENTOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO E ESCRITÓRIO

3.6.1 Recepção e processamento das amostras

No laboratório foi efetuado o recebimento das amostras de campo. Primeiramente, pesaram-se as amostras para se determinar o teor de água no solo e, após, as mesmas foram acondicionadas em estufa de circulação forçada para secagem a temperatura de 105° C por 24 horas, pesando-as posteriormente. As amostras para a determinação da concentração de sedimentos e de água na enxurrada eram pesadas e, após, adicionava-se 3 a 4 gotas de ácido clorídrico (2,5 N) para acelerar a floculação das partículas de solo dispersas, deixando em repouso por 72 h para ocorrer à decantação. Após este período, retirava-se o excesso de água das amostras com a ajuda de um sifão, levando-as para estufa onde eram secas a temperatura de 50° C por 72 horas.

Para o índice D₅₀, os sedimentos retidos nas peneiras que foram transferidos durante a chuva para potes plásticos, foram levados a estufa a 50° C para secagem e após 72 horas foram pesados. O conteúdo do balde foi passado pelo conjunto de peneiras com abertura de malhas de 0,125; 0,053; e 0,038 mm. Ainda, o conteúdo que passava pela última peneira era coletado em outro recipiente para ser contabilizado. Igualmente às amostras das peneiras vindas do campo, foram secas em estufa a 50° C por 72 horas e pesadas posteriormente. Assim, foram conseguidas as seguintes classes de tamanhos de sedimentos: > 4,75; 4,75 - 2; 2 - 1; 1 - 0,25; 0,25 - 0,125; 0,125 - 0,053; 0,053 - 0,038 e ≤ 0,038 mm.

3.6.2 Análises físicas e químicas das amostras de solo

O volume total de poros foi calculado pela relação entre densidade do solo e densidade de partículas, e o volume de microporos por meio de retenção de água após saturação da amostra do solo e submetidas à tensão de 6 kPa em mesa de tensão de areia, conforme descrito em EMBRAPA (1997). O volume de macroporos foi obtido pela diferença entre o volume total de poros e o de microporos. A densidade foi determinada pela relação massa de solo/volume do anel, em base seca a 105 °C conforme Blake & Hartge (1986).

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986), fazendo-se a dispersão em NaOH 1 mol L⁻¹ após agitação por quatro horas para determinação do teor de argila total. A areia foi determinada passando as amostras pela peneira de 0,053 mm. A densidade de partículas foi realizada pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006). A estabilidade de agregados foi determinada pela agitação vertical de agregados em água nas peneiras de 4,76, 2,00, 1,00 e 0,25 mm e os resultados expressos em diâmetro médio geométrico (DMG) seguindo a metodologia de Kemper & Chepil (1965). O carbono orgânico total (COT) foi obtido pela queima das amostras, pela metodologia de Walkley & Black modificado por Tedesco et al. (1995), através da oxidação com K₂Cr₂O₇ 1,25 mol L⁻¹ em meio ácido (H₂SO₄ concentrado) e titulação com FeSO₄ 0,25 mol L⁻¹.

3.6.3 Cálculo da intensidade, quantidade de chuva aplicada e erosividade das chuvas

A intensidade e o volume das chuvas aplicadas (Tabela 4) foram determinados com base no volume coletado nos 20 pluviômetros lidos nas provetas após cada chuva simulada. O cálculo da intensidade da chuva fez-se pela seguinte fórmula:

$$I = 10 (V_m A^{-1} T^{-1}) \quad [4]$$

Onde:

I = intensidade aplicada (mm h^{-1});

V_m = volume médio coletado nos pluviômetros (ml);

A = área de captação do pluviômetro ($53,85 \text{ cm}^2$) e;

T = duração da chuva (h).

A altura total de chuva aplicada foi determinada multiplicando a intensidade (I) pela duração da chuva (D), conforme a fórmula a seguir:

$$Q = I D \quad [5]$$

Onde:

Q = altura de chuva aplicada (mm);

I = intensidade da chuva aplicada (mm h^{-1}) e;

D = duração do teste de chuva (h).

Calculou-se a erosividade (EI) das chuvas simuladas e das chuvas naturais que ocorreram entre cada teste de chuva simulada (Tabela 4). Para o cálculo do EI das chuvas simuladas, seguiu-se o estabelecido por Wischmeier (1959), utilizou-se a equação proposta por Meyer (1958), conforme demonstrado a seguir:

$$EI = 0,2083 Q I \quad [6]$$

Onde:

EI = erosividade das chuvas ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$);

Q = altura de chuva aplicada (mm) e;

I = intensidade da chuva aplicada (mm h^{-1}).

O cálculo da erosividade (EI_{30}) das chuvas naturais foi obtido para chuvas individuais, conforme descrito por Wischmeier & Smith (1978). Utilizando-se dados de chuva natural obtidos em um pluviograma, cotaram-se as chuvas em segmentos de mesma intensidade e calculou-se o EI_{30} baseado na equação desenvolvida por Foster et al. (1981):

$$E = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad [7]$$

sendo:

E = energia cinética por mm de chuva ($\text{MJ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) e;

I = intensidade da chuva (mm h^{-1}).

Tabela 4 - Intensidade e altura das chuvas simuladas e altura da chuva natural, bem como o EI das chuvas simuladas e o EI₃₀ das chuvas naturais.

(continua)				
Teste de chuva	Tratamento	Chuva simulada		EI
	-	mm h ⁻¹	mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
Teste 1	SRA	63	95	1.244
	SRE	60	91	1.147
	SEA	58	88	1.069
	SEE	61	92	1.166
	SDE	65	97	1.315
Teste 2	SRA	73	110	1.672
	SRE	73	109	1.647
	SEA	74	111	1.697
	SEE	74	111	1.721
	SDE	71	106	1.570
Chuva natural			mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			36	55
Teste 3	SRA	63	94	1.241
	SRE	61	91	1.151
	SEA	60	91	1.144
	SEE	63	94	1.235
	SDE	58	87	1.042
Chuva natural			mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			203	784
Teste 4	SRA	63	94	1.239
	SRE	61	91	1.160
	SEA	57	86	1.022
	SEE	59	89	1.102
	SDE	63	943	1.233
Chuva natural			mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			119	210
Teste 5	SRA	61	92	1.167
	SRE	60	90	1.124
	SEA	60	89	1.111

Tabela 4 - Intensidade e altura das chuvas simuladas e altura da chuva natural, bem como o EI das chuvas simuladas e o EI₃₀ das chuvas naturais.

(conclusão)				
Teste de chuva	Tratamento	Chuva simulada		EI
	-	mm h ⁻¹	mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
Teste 6	SEE	61	91	1.153
	SDE	62	93	1.193
	Chuva natural		mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			76	98
	SRA	63	95	1.244
	SRE	64	95	1.260
	SEA	65	98	1.339
	SEE	65	98	1.323
	SDE	64	97	1.296
	Chuva natural		mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			202	316
	SRA	65	97	1.315
Teste 7	SRE	66	100	1.379
	SEA	68	102	1.436
	SEE	66	99	1.371
	SDE	68	101	1.428
	Chuva natural		mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			184	790
Teste 8	SRA	64	96	1.276
	SRE	65	98	1.332
	SEA	67	100	1.390
	SEE	65	98	1.334
	SDE	68	102	1.453
	Chuva natural		mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
			41	141

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

3.6.4 Cálculo das perdas de solo e água e concentração de sedimentos

Por meio de uma planilha de cálculo, foram determinadas as taxas instantâneas de perdas de solo e água para intervalos de 1 min por interpolação linear dos valores de perdas quantificadas a campo a cada 5 min.

A concentração de sedimentos existente na enxurrada foi determinada dividindo-se a massa de sedimentos pela massa de sedimentos + água, fazendo-se a média das últimas cinco leituras da taxa instantânea de enxurrada, a partir do momento em que a enxurrada encontrava-se constante.

A taxa instantânea de perda de solo, expressa em kg h^{-1} , foi conseguida multiplicando-se a taxa instantânea de enxurrada, expressa em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ a cada minuto, pela concentração instantânea de sedimentos, expressa em kg m^{-3} . A quantidade total de solo perdida por erosão foi obtida pela integração das taxas instantâneas de perda de solo, extrapolando-se os resultados gerados na área da parcela para um ha, expressando o resultado em Mg ha^{-1} .

Para efeito de comparação dos resultados obtidos, se fez a padronização dos mesmos. Os dados de perda total de água e perda total de solo foram ajustados para a intensidade de chuva planejada de 65 mm h^{-1} , conforme definido por Cogo (1981). A perda de água ajustada foi obtida seguindo a equação a seguir:

$$FCI = i_{\text{planejada}} i_{\text{aplicada}}^{-1} \quad [8]$$

Onde:

FCI = fator de correção da intensidade para a perda total de água
 $i_{\text{planejada}}$ = intensidade de chuva planejada (65 mm h^{-1})

i_{aplicada} = intensidade de chuva que foi medida durante os testes de chuva simulada (mm h^{-1}).

O ajuste das perdas de solo para a intensidade da chuva foi efetuado elevando-se ao quadrado o resultado da divisão da intensidade da chuva planejada pela intensidade da chuva aplicada, conforme a equação a seguir:

$$FCI = (i_{\text{planejada}} i_{\text{aplicada}}^{-1})^2 \quad [9]$$

Onde:

FCI = Fator de correção da intensidade para a perda total de solo

$i_{planejada}$ = intensidade de chuva planejada (65 mm h^{-1})

$i_{aplicada}$ = intensidade de chuva real que foi medida durante os testes de chuva simulada (mm h^{-1}).

Os dados de perda de solo ajustadas para a intensidade ainda foram ajustados para a declividade do terreno, padronizando as perdas para a declividade média das parcelas experimentais, $0,134 \text{ m m}^{-1}$, seguindo o proposto por Wischmeier & Smith (1978). O ajuste para a declividade foi baseado na seguinte fórmula:

$$S = 0,065 + 4,56 \text{ sen } \theta + 65,41 (\text{sen } \theta)^2 \quad [10]$$

Onde:

S = fator declividade da USLE e;

θ = ângulo de declive do terreno.

O fator de correção para a declividade (FCS) foi obtido pela divisão do fator S da parcela cujo dado se queria corrigir pelo fator S da declividade média das parcelas, conforme demonstrado na equação a seguir:

$$FCS = S_{\text{parcela}} S_{\text{média}}^{-1} \quad [11]$$

Onde:

FCS = fator de correção para a declividade;

S_{parcela} = fator S da declividade da parcela e;

$S_{\text{média}}$ = fator S da declividade média de todas as parcelas experimentais ($0,134 \text{ m m}^{-1}$ neste caso).

Assim, ajustou-se a perda de solo multiplicando-se a perda de solo gerada na parcela pelos dois fatores de correção (FCI da eq. 9 e FCS da eq. 11), conforme a expressão que segue:

$$P_{\text{solo ajustada}} = P S_{\text{parcela}} FCI FCS \quad [12]$$

Onde:

$P_{\text{solo ajustada}}$ = perda de solo ajustada para a intensidade e declividade (Mg ha^{-1});

$P S_{\text{parcela}}$ = perda de solo da parcela (t ha^{-1});

FCI = fator de correção para intensidade e;

FCS = fator de correção para a declividade.

3.6.5 Cálculo da rugosidade superficial do solo

As alturas das varetas obtidas com a interpretação das fotos que representava o microrelevo foram geradas por meio do uso do programa *Profile Meter Program* proposto por Wagner & Yiming Yu (1991) e Wagner (1992), o qual detecta as alturas das varetas em fotografias com formato digital. O índice de rugosidade foi calculado pelo método proposto por Kamphorst et al. (2000), onde não se transformam os dados para log, nem se eliminam os valores extremos (fórmula 13). Para o cálculo da rugosidade superficial do solo se contou com a ajuda do programa computacional proposto por Miranda (2000). O índice de rugosidade pode ser gerado nas condições originais, linear e ao acaso e, para este experimento, utilizou-se a rugosidade na condição ao acaso (RR), onde é eliminada a influência da declividade do terreno e a tendenciosidade decorrente do efeito das marcas do preparo do solo, conforme demonstrado.

$$RR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n}} \quad [13]$$

Onde:

RR = índice de rugosidade ao acaso (mm);

Z_i = altura de cada vareta (mm);

$\bar{Z}$ = altura média das varetas (mm) e;

n = número de valores de altura.

3.6.6 Cálculo do índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada

Para o cálculo do índice D_{50} , utilizou-se um procedimento semelhante ao adotado por Gilley et al. (1987), onde fez-se uma interpolação entre o diâmetro das duas peneiras onde encontrava-se a metade da massa de sedimentos, com o auxílio de uma planilha Excel. O D_{50} dos sedimentos contidos

na enxurrada corresponde a um valor numérico, em que 50% da massa dos sedimentos apresenta tamanho maior do que esse valor e os outros 50% da massa dos sedimentos, tamanho menor (mediana dos sedimentos).

3.6.7 Profundidade total do fluxo, tensão cisalhante da enxurrada e coeficiente de rugosidade de manning

A profundidade total do fluxo superficial (Y) foi computada conforme descrito em Cogo (1981) e em Bertol (1995), rearranjando a equação da continuidade para o fluxo superficial, ou seja:

$$Y = qm V^{-1} \quad [14]$$

Onde,

Y = profundidade total do fluxo superficial (m);

qm = a taxa de descarga no ponto médio da parcela ($m^3 s^{-1} m^{-1}$) e;

V = velocidade da enxurrada ($m.s^{-1}$).

O qm é computado dividindo-se a taxa de descarga medida na extremidade inferior da parcela (conforme descrito no item 3.5.1) pela largura da parcela (3,5 m) e, posteriormente, dividindo-se este valor por 2, obtendo-se assim, o valor referente ao ponto médio da parcela.

A tensão cisalhante total do fluxo superficial, τ ($N m^{-2}$), foi computada de acordo com Foster et al. (1982b), ou seja:

$$\tau = \gamma Y s \quad [15]$$

Onde,

γ = peso específico da água de enxurrada ($9.807 N m^{-3}$) e;

s = o seno do ângulo do declive.

Foi computado, ainda, o coeficiente de rugosidade hidráulica total de Manning, nr, de acordo com Foster et al. (1982b), ou seja:

$$nr = (Y^{2/3} s^{1/2}) V^{-1} \quad [16]$$

Onde,

Y = profundidade total do fluxo superficial (m);

s = o seno do ângulo do declive e;

V = velocidade da enxurrada (m s^{-1}).

3.6.8 Estimativa da massa de raízes

Devido não ter sido avaliada a massa de raízes por causa das limitações práticas impostas pelo experimento, realizou-se uma estimativa da massa de raízes, com base na relação entre a massa seca de parte aérea e a massa de raízes obtida por Wolschick (2014) para um Cambissolo Húmico, para o mesmo clima e área próxima ao do presente experimento. Utilizaram-se a relação de massa de raízes e de parte aérea das culturas da aveia e ervilhaca. Para a determinação da massa de raízes ao longo do tempo, foi seguido a equação encontrada por Volk (2006) relativo a redução temporal da massa na camada de 0-0,2 m para as mesmas culturas. Pelo fato destes valores terem sido gerados por meio de estimativa, não foi aplicada análise estatística nos mesmos. Realizou-se apenas uma breve discussão desses dados, os quais foram incluídos na análise de trilha para melhor compreender os resultados, já que o efeito das raízes está presente mesmo indiretamente sobre os demais atributos estudados.

3.6.9 Delineamento experimental, análise estatística, e análise dos dados para gerar os indicadores de qualidade do solo

O experimento continha no total dez parcelas, com os tratamentos dispostos aleatoriamente na área experimental, compondo desta forma, um delineamento inteiramente casualizado. Cada tratamento era repetido uma vez no campo, dentro de cada teste de chuva simulada. Assim, os dados foram analisados por meio do pacote estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) versão 9.2 para Windows®, utilizando-se o procedimento MIXED (modelos mistos). Para a escolha da

matriz de variância e covariância, utilizou-se o critério de informação de Akaike (Wolfinger, 1993). Foi possível detectar os efeitos principais das causas de variação e a interação entre eles. O teste de chuva (época) foi considerado de efeito fixo e as variáveis respostas consideradas de efeito aleatório (Littel et al., 2000). O nível de significância utilizado foi de 5% ($p > 0,05$).

Para propor os indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica e seus respectivos pesos, foi utilizada a base a proposta por Cogo et al. (2003), conforme argumentado anteriormente (item 3.2.3). A fim de identificar indicadores do solo para a função de resistir à desagregação por impacto das gotas de chuva (função **i**), relacionou-se os atributos de superfície e subsuperfície com as perdas de solo; para a função de facilitar a entrada de água no solo (função **ii**), relacionou-se os atributos com as perdas de água; e para a função de resistir à desagregação pelo escoamento superficial (função **iii**), relacionou-se os referidos atributos com a velocidade de escoamento.

Para determinar o grau de associação entre os atributos físicos e químicos de subsuperfície e superfície com os parâmetros relacionados à enxurrada (perdas de solo, perdas de água e velocidade de escoamento), foram realizadas análises de correlação de Pearson e análise de trilha (path coefficient analysis) que fornecem os coeficientes de trilha. Estes coeficientes medem a influência direta de uma variável sobre outra, independente das demais, no contexto das relações de causa e efeito. Essas análises também permitem desdobrar os coeficientes de correlação simples em seus efeitos diretos e indiretos (PACHECO, 2010).

As perdas de solo, perdas de água e velocidade de escoamento, foram consideradas variáveis dependentes e analisadas separadamente, pois estão associadas direta e indiretamente às funções específicas que o solo deve apresentar para apresentar uma boa qualidade do ponto de vista de redução da erosão hídrica. Como variáveis independentes foram consideradas os atributos de superfície e subsuperfície do solo.

Para um melhor entendimento, as análises foram separadas para os tratamentos que apresentavam cobertura do solo por resíduos culturais (SRA e SRE) e para os que apresentavam rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE). Para maior consistência da análise de trilha, o conjunto de variáveis deve apresentar colinearidade fraca e, por isso, a seleção dos dados foi realizada após análise de multicolinearidade realizada por meio do programa GENES versão 6.1.

Levando em consideração a coerência teórica, as complementações, alterações e sugestões para os indicados foram baseadas nos resultados obtidos e em observações em campo e, especialmente, pela análise de trilha, avaliando o efeito direto e indireto das variáveis sobre as perdas de solo, perdas de água e velocidade de escoamento. O peso de cada indicador foi definido de acordo com a sua relevância nos resultados, tanto de efeito direto quanto indireto sobre os parâmetros relacionados à enxurrada.

O peso da cobertura e rugosidade superficial do solo, quando sugeridas como indicadoras de qualidade do solo para a mesma função e nível categórico, foi obtido dividindo-se a perda de solo e água e a velocidade da enxurrada dos tratamentos com cobertura do solo (SRA e SRE) pelos resultados obtidos nos tratamentos com rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE). Desta forma, identificaram-se qual era a diferença entre estas condições e, posteriormente, atribuiu-se a mesma proporção de diferença para o peso total da referida função. Para as funções i, ii e iii, fez-se o procedimento descrito acima para os resultados de perdas de solo, perdas de água e velocidade de enxurrada.

Os resultados encontrados permitiram sugerir indicadores de qualidade que são válidos unicamente para o solo do experimento (Cambissolo Húmico), sendo incorreto extrapolar tais resultados para outros tipos de solo, uma vez que estes, de outras classes texturais, apresentam propriedades físicas e químicas distintas do Cambissolo em questão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES DO SOLO

Os valores de probabilidade (valor p) para os fatores tratamento (Trat), testes de chuva (T) e interação entre os fatores (Trat x T) para as variáveis respostas carbono orgânico total (COT), diâmetro médio geométrico de agregados (DMG), densidade do solo (DS), porosidade total do solo (PT), volume de macroporos (MAP), volume de microporos (MIP) na camada de 0 – 0,025 m e teor de água no solo nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m (UG01 e UG12), estão expostos na tabela 5. As variáveis respostas apresentaram efeitos significativos de Trat a 5% de probabilidade ($p > 0,05$), T e, com exceção da DS, apresentaram interação com os testes de chuva. No apêndice A estão expostos os valores médios de cada tratamento, além dos valores em cada testes de chuva para o COT, DMG, DS, PT, MAP, MIP, UG01 e UG12.

Tabela 5 - Valores de p pelo DMS de Fisher para os fatores tratamentos (Trat), testes de chuva simulada (T) e interação (Trat x T) para as variáveis estudadas, em um Cambissolo Húmico.

Fonte de variação	Gl	Significância ($p > F$)*							
		COT	DMG	DS	PT	MAP	MIP	UG01	UG12
Trat	4	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0032	<0,0001	<0,0001
T	7	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Trat x T	28	<0,0017	<0,0001	<0,1090	<0,0001	<0,0001	<0,0003	<0,0001	<0,036

COT: Carbono orgânico total, DMG: diâmetro médio geométrico, (DS) densidade do solo, PT: porosidade total do solo, MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos e UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, GL: graus de liberdade. *Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Os valores médios dos oito testes de chuva simulada de cada tratamento para as variáveis respostas COT, DMG, DS, PT, MAP, MIP, UG01 e UG12, estão expostos no Tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios dos tratamento após os oito testes de chuva para as propriedades físicas e químicas do solo estudadas, em um Cambissolo Húmico.

Tratamento	COT g kg ⁻¹	DMG mm	DS g cm ⁻³	PT -----	MAP m ³ m ⁻³	MIP -----	UG01 - m ³ m ⁻³ -	UG12 -
SRA	2,89	4,47	1,24	53	20	33	0,27	0,31
SRE	2,77	4,18	1,30	50	15	35	0,26	0,31
SEA	2,67	4,30	1,23	53	18	35	0,24	0,31
SEE	2,20	4,13	1,26	50	17	34	0,21	0,27
SDE	2,08	3,52	1,20	53	16	37	0,26	0,34

COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Teor de carbono orgânico total (COT)

O maior teor de COT foi do SRA (Tabela 6), com média de 2,89 g kg⁻¹, seguido pelos tratamentos SRE, SEA, SEE e SDE com médias respectivas de 2,77, 2,67, 2,20 e 2,08 g kg⁻¹, respectivamente. O maior teor de COT no SRA é resultado do não revolvimento do solo, enquanto se manteve os resíduos culturais sobre a superfície e a massa de raízes sob a superfície do solo, tendo uma decomposição lenta das referidas massas. A manutenção ou o aumento do COT no solo é importante para incrementar a fertilidade, e sua capacidade de troca de cátions (CTC) e, essencialmente, a resistência do solo à erosão. O

aumento do teor de COT correlaciona-se positivamente com a estabilidade dos agregados em água, conforme verificado por Campos et al. (1995), que observaram correlação positiva de 0,85 entre matéria orgânica e estabilidade de agregados em água.

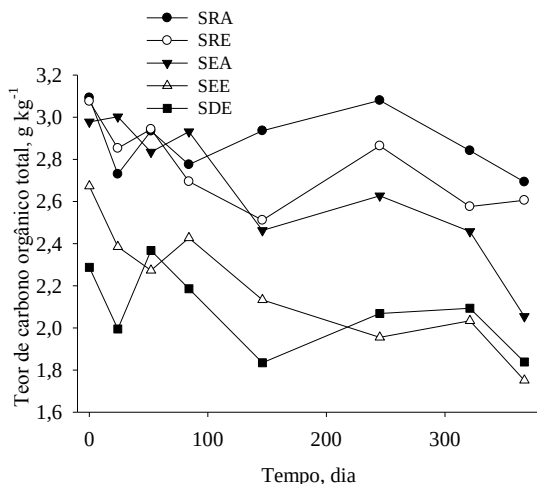
Independente do manejo, a cultura do azevém propiciou maior teor de COT em comparação à ervilhaca, com média de 2,78 g kg⁻¹ dos tratamentos com azevém (SRA e SEA) contra a média de 2,49 g kg⁻¹ para os tratamentos com ervilhaca (SRE e SEE). Tais resultados estão de acordo com o encontrado por Andrade et al. (2012), onde, após 12 anos de cultivo, a semeadura direta com sucessão de milho e ervilhaca aumentou o teor de COT no solo em comparação à rotação de feijão-aveia-milho-nabo-soja-ervilhaca, explicados pela alta produção de matéria seca do milho, sua decomposição mais lenta e maior relação C/N, de acordo com Casto Filho et al. (1998), Gilmour et al. (1998) e Andrade et al. (2012).

O SDE apresentou o menor teor de COT (Tabela 6), resultado do não cultivo do solo por um período superior à dois anos, além do seu revolvimento constante, o que propiciou em maior aeração, atividade microbiológica e decomposição da matéria orgânica existente. Mesmo com cultivo do solo, Bertol et al. (2001), Albuquerque et al. (2005) e Andrade et al. (2012), encontraram menores teores de COT em solos revolvidos (preparo convencional) quando comparado aos solos sem ou com menor grau de revolvimento, justificando que o revolvimento distribui os resíduos na camada preparada e aumenta o contato solo-resíduo, o que ativa a microbiota do solo e acelera sua decomposição dos resíduos.

O maior teor médio de COT ocorreu no teste 1 de chuva (T1), com 2,82 g kg⁻¹ (Apêndice A) e, com 2,19 g kg⁻¹, o menor valor ocorreu aos 367 dias após o teste 1 (T8). Entre os tratamentos, com uma diferença de 0,92 g kg⁻¹ entre os tratamentos, o SEE teve o maior decréscimo temporal do COT. O maior decréscimo neste tratamento deve-se, a manutenção do solo descoberto durante o estudo, ao revolvimento (uma

escarificação) e à baixa relação C/N das raízes de ervilhaca remanescentes.

Figura 7 - Teor de carbono orgânico total na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

O tratamento SDE não apresentou grande diminuição do COT, provavelmente, justificado pelo conteúdo inicial baixo de COT ($2,29 \text{ g kg}^{-1}$), e pela complexação do COT remanescente com partículas de argila, dificultando assim, sua mineralização. Bayer et al. (2000) observaram, em um Argissolo Vermelho, que a taxa de perda anual de COT foi maior no preparo convencional que no preparo reduzido, ressaltando que isso dependeria da

textura e mineralogia do solo, das condições climáticas e da intensidade da erosão.

De uma forma geral, o COT diminuiu ao longo do tempo para todos os tratamentos, com um comportamento similar entre eles. Entretanto, ao se observar a Figura 7, nota-se que, com exceção do SEE, todos os tratamentos apresentaram ligeiro aumento no COT entre os 146 e 245 dias, diminuindo gradativamente a partir do teste 7 (T7). Já o SEE diminuiu com mais intensidade a partir dos 84 dias, resultado da escarificação e da baixa massa de raízes da cultura da ervilhaca.

Comparando os tratamentos com resíduos sobre a superfície, os teores de COT passaram a diferir com mais evidência a partir dos 84 dias (Figura 7), onde o teor do SRE diminuiu mais, reflexo da menor massa de resíduos e raízes, associado à menor relação C/N dos mesmos, concordando com Gilmour et al. (1998). Nota-se que todos os tratamentos mantiveram e/ou aumentaram o COT aos 245 dias após o teste 1, coincidindo com o período de menor temperatura na região, o que diminuía a atividade microbiana do solo.

4.1.2 Estabilidade de agregados em água (DMG)

O tratamento SRA apresentou a maior estabilidade de agregados em água representada pelo diâmetro médio geométrico (DMG), seguido pelo SEA, SRE e SEE, com médias respectivas de 4,47, 4,30, 4,18 e 4,13 mm e, com média de 3,52 mm, o SDE apresentou o menor DMG (Tabela 6). A manutenção ou o aumento da estabilidade de agregados em água é importante, uma vez que ela determina a resistência do solo à desagregação pelo impacto de gotas da chuva e pelo fluxo concentrado nos canais e, conseqüentemente, à erosão hídrica (DE BAETS & POLSEN, 2010). Angulo et al. (1984) encontraram coeficiente de correlação de 0,91 entre a resistência dos agregados ao impacto das gotas de chuva simulada e a estabilidade dos agregados em água.

Os resultados (Tabela 6) demonstram o efeito benéfico do azevém na estabilidade dos agregados, pois o DMG foi maior em ambos os tratamentos com esta cultura (SRA e SEA) quando comparados aos tratamentos com ervilhaca, com médias respectivas de 4,39 e 4,16 mm para o azevém e ervilhaca, concordando com o exposto por Dechen et al. (1981), Brandão & Silva (2012) e Dalla Rosa et al. (2013a). Estes autores afirmaram que as gramíneas tem maior capacidade de agregar o solo do que as leguminosas. Fidalski & Tormena (2007) afirmam que as gramíneas perenes têm ação agregante mais prolongada do que as leguminosas, graças à presença de um sistema radicular fasciculado, mais denso, com maior contato com as partículas do solo. Este efeito benéfico das raízes na estabilidade de agregados ocorre mesmo após a morte das plantas, que permanece ativo depois do corte e libera exsudato que aumentam a agregação do solo (DALLA ROSA et al., 2013a).

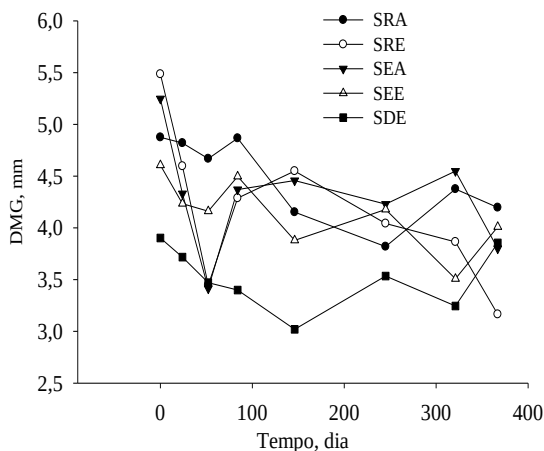
Comparando o manejo de superfície nos tratamentos cultivados, a escarificação do solo com apenas as raízes das culturas (SEA e SEE) diminuiu o DMG quando comparada aos tratamentos sem revolvimento e com os resíduos culturais sobre a superfície (SRA e SRE), com médias de 4,33 e 4,22 mm, respectivamente. Segundo Carpenedo & Mielniczuk (1990), a maior coesão dos macroagregados proporcionada pela aproximação das partículas devido ao preparo e aos ciclos intensos de secagem e umedecimento, pode enfraquecer as ligações entre partículas na camada de 0–0,05 m do solo.

O menor DMG do SDE, 3,52 mm, está de acordo com os resultados de Bertol et al. (2006) e, estes autores, afirmam que a menor estabilidade de agregados nessa condição é resultado do revolvimento constante do solo e da falta de cultivo, que provoca uma parcial quebra mecânica dos agregados estruturais, com consequente diminuição do teor de matéria orgânica, atividade biológica e resistência dos agregados à ação da água.

Temporalmente, o DMG variou entre os tratamentos e entre os testes de chuva simulada (Figura 8), de modo que a maior média foi encontrada no T1, com 4,82 mm (Apêndice A), mas o SDE não apresentou diminuição visível ao longo do tempo. Esta tendência à diminuição justifica-se pela diminuição do COT, seja pela decomposição ou pela erosão em si, uma vez que a estabilidade dos agregados correlaciona-se positivamente com o aumento do teor de COT (CAMPOS et al., 1995). Já o SDE praticamente não diminuiu o DMG temporalmente, pois a estabilidade de agregados já era baixa no início, e devido a complexação da MO remanescente pelas partículas de argila que manteve a estabilidade mínima entre os agregados menores. Ainda, o aumento da DS ao longo do tempo, também faz com que ocorra maior DMG, conforme destacado por Dissmeyer & Foster (1981), Eltz et al. (1989) e Schick (2014).

Aos 52 dias após o T1 (teste 3 de chuva simulada) ocorreu uma diminuição acentuada do DMG nos tratamentos SRE e SEA (Figura 8) e, em menor amplitude, no SEE. Provavelmente, este decaimento, se deve à atividade microbiana incentivada pela decomposição dos resíduos que foi acentuada no tratamento SRE e ao revolvimento do solo no caso dos tratamentos SEA e SEE, o que, de certa forma, foi perceptível na diminuição do teor de COT nos tratamentos SEA e SEE.

Figura 8 - Diâmetro médio geométrico na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

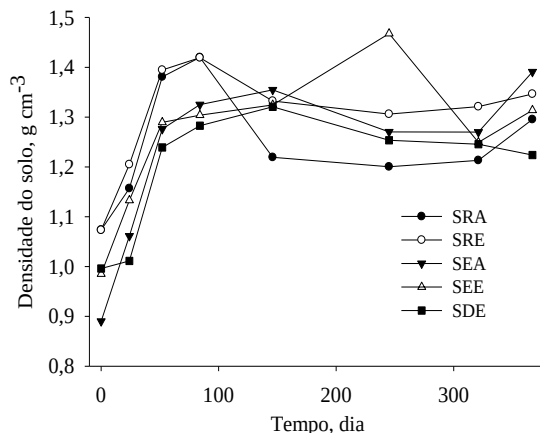
4.1.3 Densidade do solo (DS)

A menor média de densidade do solo (DS) foi do SDE (Tabela 6), com $1,20 \text{ g cm}^{-3}$, embora sem diferença expressiva para o SEA, SRA e SEE, com médias respectivas de 1,23, 1,24 e $1,26 \text{ g cm}^{-3}$. Mesmo sem muita diferença, a maior densidade média do solo foi no SRE, com $1,30 \text{ g cm}^{-3}$. Tais resultados são similares aos obtidos por Andrade et al. (2010) para o mesmo solo, onde não observaram diferença na DS entre semeadura direta e preparo convencional. A média geral dos tratamentos de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, está abaixo do limite crítico para mesma classe textural Franco-argilossiltosa (REICHERT et al. 2003).

Conforme se visualiza na Figura 9, todos os tratamentos apresentaram acentuado aumento na DS até os 52 dias (32%), com menores variações a partir deste momento, demonstrando rápido adensamento da superfície do solo e, provavelmente, um encrostamento, como consequência da quebra dos microagregados pelo impacto direto das gotas de chuva no caso dos tratamentos descobertos (SEA, SEE e SDE), resultando em diminuição da porosidade e, conseqüentemente, da infiltração de água no caso dos tratamentos descobertos, conforme verificado por Duley (1939) e Bertol et al. (1989). Ainda, nos tratamentos SRA e SRE, assim como na semeadura direta, conforme demonstrado por Dalla Rosa et al. (2013b), mesmo sob a presença de resíduos sobre a superfície do solo, há a formação da crosta. Este efeito pôde ser visualizado após o T2 nos tratamentos cobertos por resíduos, pelo ligeiro aumento da DS.

Embora não tenha havido diferença expressiva entre as DS médias, pode-se observar influência dos manejos do solo, pois a escarificação do solo nos tratamentos SEA, SEE e SDE diminuiu inicialmente a DS em relação aos tratamentos com resíduos sobre a superfície (Figura 9 e Apêndice A). Porém, os efeitos do revolvimento do solo são de caráter efêmero, dependendo da textura do solo, das condições antecessoras da área e da precipitação ocorrente na área. Assim, com a exposição do solo ao impacto das gotas de chuva, conjuntamente a aplicação de chuvas com alta intensidade, gerou rápido adensamento da superfície do solo (Figura 9). Entretanto, Albuquerque et al. (2001) observaram diminuição da densidade do solo sob preparo convencional quando comparado à semeadura direta, provavelmente pelo revolvimento do solo no preparo convencional e ao tráfego intenso de maquinários sobre o solo na semeadura direta.

Figura 9 - Densidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

Dentre os tratamentos com resíduos culturais sobre a superfície do solo, o SRA propiciou a menor DS que o SRE (Tabela 6), devido à maior densidade de raízes da cultura do azevém, o que aumenta a resistência do solo a desagregação e, consequente, selamento da superfície, discordando de Fidalski & Tormena (2007), os quais observaram que as gramíneas e leguminosas não diferiram a DS entre si. Este comportamento ficou destacado a partir dos 146 dias, em que a DS foi sempre menor no SRA do que no SRE. Para os tratamentos escarificados, a maior DS ocorreu no SEE, mas com pequena diferença e devido ao alto valor aos 245 dias que refletiu na DS média.

4.1.4 Porosidade total do solo (PT)

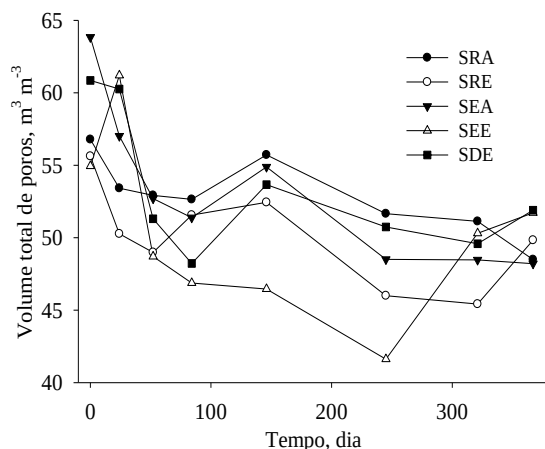
O maior valor de porosidade total (PT) foi encontrado no SRA, SEA e SDE, com média de $53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que os tratamentos com menor PT foram o SRE e SEE, com $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em ambos (Tabela 6), sem diferença expressiva entre os manejos de superfície. Ainda, o cultivo do solo não influenciou a PT (Figura 10), discordando de Andrade et al. (2010), onde encontraram maior PT quando mantiveram o solo sob semeadura direta com sucessão milho-ervilhaca, em comparação à rotação de culturas milho-aveia-soja-nabo, e comparado ainda ao preparo convencional com rotação e sucessão de culturas. Igualmente, Albuquerque et al. (2001) obtiveram uma porosidade maior sob preparo convencional em relação à semeadura direta, justificando tal diferença pela maior macroporosidade ocasionada pelo preparo do solo no preparo convencional.

A PT comportou-se diferentemente entre as culturas, tendo sido maior sob azevém do que sob ervilhaca (Apêndice A), independentemente se os seus resíduos foram mantidos sobre a superfície do solo, ou se estes foram retirados mantendo-se apenas as raízes e escarificando o solo posteriormente. Estes dados discordam de Dalla Rosa et al. (2013a), onde as culturas não interferiram na PT, seja na linha ou na entrelinha dos vinhedos. Conforme pode-se visualizar na Figura 10, tanto nos tratamentos com resíduos sobre a superfície quanto os escarificados apenas com as raízes das culturas, mostraram tendência da PT ser maior em cultivo de azevém, embora esta diferença tenha sido muito pequena.

Houve diminuição da PT ao longo do tempo, passando de $58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no teste 1 de chuva para $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ aos 367 dias após o teste 1 (T8), sem diferença expressiva entre os tratamentos (Apêndice A). Provavelmente, esta redução na PT deve-se à diminuição da macroporosidade pelo encrostamento da superfície, independente da manutenção e/ou da quantidade

de resíduos remanescentes sobre a superfície, concordando com Bertol et al. (1989) e Dalla Rosa et al. (2013b). Nota-se um comportamento similar entre os tratamentos no decorrer do tempo, porém, pode-se perceber que entre os 146 e 245 dias após o teste 1 de chuva, o tratamento SEE apresentou valores menores que os demais, mesmo sem afetar o valor médio do tratamento.

Figura 10 - Porosidade total na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Macroporosidade do solo (MAP)

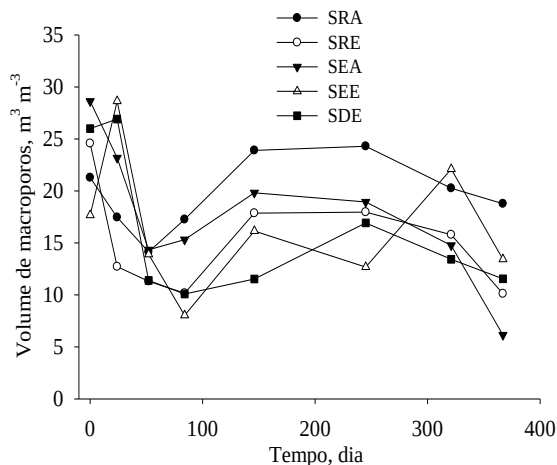
A maior macroporosidade (MAP) média foi do tratamento SRA (Tabela 6), com $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, seguido pelo SEA, SEE e SDE com médias de 17, 17 e $16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Com $15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de média, a menor MAP foi encontrada no SRE. Tais resultados discordam de Albuquerque et al. (2001) e Bertol et al. (2004a), onde o preparo do solo executado no preparo convencional aumentou a macroporosidade em relação à semeadura direta. Provavelmente, devido ao efeito protetor dos resíduos em retardar o encrostamento e do benefício das raízes do azevém na estrutura do solo e na formação de galerias após sua decomposição.

Embora a média entre os tratamentos tenha sido baixa, o SRA, com maior MAP, apresentou o maior valor dentre os tratamentos em quatro testes de chuva, e demonstrou a maior estabilidade de seus macroporos após os 84 dias (Figura 11), pois manteve a MAP acima dos demais tratamentos até o final do período experimental.

O maior valor de MAP, na média dos testes de chuva simulada, foi encontrado no teste 1, enquanto o menor ocorreu aos 52, 84 e 367 dias após o teste 1 (Figura 11 e Apêndice A). Tais resultados apresentaram o mesmo comportamento da DS, porém, inversamente, pois, onde houve aumento da DS, a MAP diminuiu. Dentre os tratamentos, a maior amplitude de MAP ocorreu no SEA, onde, no teste 1 de chuva simulada ocorreu o maior valor, e aos 367 dias após teste 1, a menor média dentre todos.

Com exceção do SEA no teste 8, e o SEE no teste 4 de chuva simulada, onde o volume de MAP foi de 6 e $8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente, os demais resultados de cada tratamento estiveram acima dos $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ necessários para que ocorram as trocas gasosas e para o livre crescimento das raízes da maioria das culturas, conforme destacado por Taylor & Ashcroft (1972).

Figura 11 - Macroporosidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

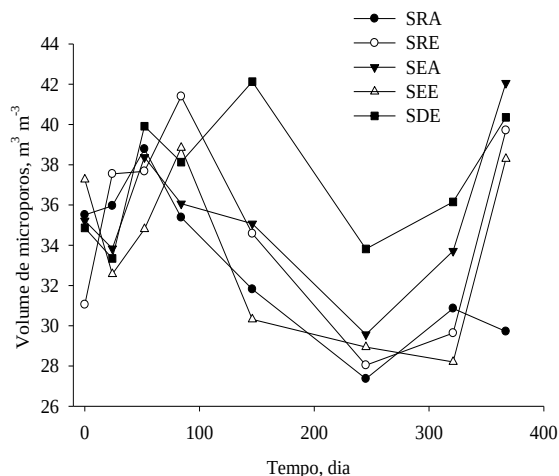
Fonte: Próprio autor.

4.1.6 Microporosidade do solo (MIP)

A maior microporosidade do solo (MIP) na camada de 0-0,025 m foi encontrada no tratamento SDE (Figura 12), com $37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 6), praticamente igual à do SRE e SEA com $35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e à do SEE e SRA, com 34 e $33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Tais resultados discordam dos de Andrade et al. (2010), onde a semeadura direta proporcionou maior MIP do que o preparo convencional. Bertol et al. (2001) destacam que a presença de elevados valores de MIP é importante, uma vez que esta é

responsável pela retenção de água no solo e consequentemente disponibilização para as plantas.

Figura 12 - Microporosidade do solo na camada de 0-0,025 m, nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

A MIP variou de $27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no SRA até $45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no tratamento SEA após 245 e 367 dias após o primeiro teste de chuva simulada (Apêndice A), enquanto, o volume de MAP variou de 4 a $29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Apêndice A), demonstrando que os macroporos estavam mais sujeitos a mudanças impostas pelo manejo do que os microporos, concordando com Trein et al. (1991), Albuquerque et al. (2001) e Bertol et al. (2004a). Entre os testes de chuva, a variação foi pequena, de 30 a $39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,

concordando com o exposto anteriormente, já que a MIP sofre menor influência que a MAP pelo manejo.

Apesar da pequena diferença, o volume médio de microporos foi maior no SDE, como pode ser observado na Figura 12, principalmente pela maior MIP aos 145, 245 e 321 dias após o teste 1 de chuva. Também, pode-se observar o menor volume de MIP no SRA, o qual decaiu com o tempo a partir dos 52 dias até os 245 dias após o teste 1 de chuva, com um pequeno aumento a partir deste momento. Com exceção do SRA, todos os tratamentos tiveram a MIP aumentada no último teste de chuva simulada, ou seja, aos 367 dias após o teste 1 de chuva.

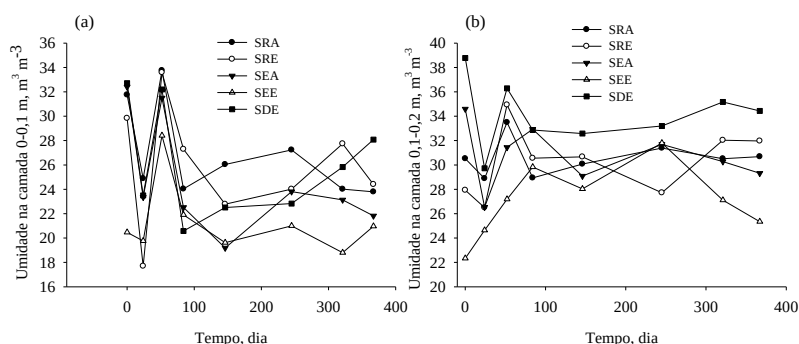
4.1.7 Teor de água no solo (UG)

Os teores de água gravimétrica no solo antecedente às chuvas nas camadas de 0-0,1 m (Figura 13a) e 0,1-0,2 m (Figura 13b) (UG01 e UG12) variaram de 0,21 a 0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0-0,1 m e de 0,27 a 0,34 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,1-0,2 m, na média dos tratamentos (Tabela 6). O menor valor, na camada de 0-0,1 m do solo, foi 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no tratamento SRE, 24 dias após o teste 1 e, o maior, 0,34 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, nos tratamentos SRA e SRE aos 52 dias após o teste 1 de chuva. Já para a camada de 0,1-0,2 m, o menor valor foi 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no SEE (teste 1) e, o maior, 0,39 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no SDE (também no teste 1), conforme pode se visualizar na Figura 13a.

Dentre os tratamentos, o SRA manteve mais água na camada de 0-0,1 m do solo (0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na média dos testes), embora, sem diferença expressiva para o SRE e SDE. Possivelmente, isso ocorreu pela diminuição da temperatura e do vento na superfície, pois os resíduos culturais cobriam e protegiam o solo, concordando com Bertol et al. (2004a). Já o tratamento cultivado que manteve menos água nesta camada do solo foi o SEE (0,21 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na média dos testes), discordando de Marioti (2012), onde não houve diferença entre tratamentos para o mesmo solo. Com exceção do SDE, os tratamentos

escarificados mantiveram menor teor de água no solo em comparação aos solos cobertos por resíduos culturais, concordando com o exposto por Bertol et al. (2004a).

Figura 13 - Teores de água gravimétrica no solo antecedente às chuvas nas camadas de 0-0,1 m, (a), e 0,1-0,2 m, (b), nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

Para os testes de chuva, na média dos tratamentos, o maior teor de água no solo ocorreu aos 52 dias após o teste 1 de chuva, $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e, o menor, aos 24 e 146 dias após o mesmo teste de chuva simulada, com $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Apêndice B). Esta variação de conteúdo de água no solo foi dependente das precipitações naturais que ocorreram próximo aos testes de chuva simulada, e não à precipitação total ocorrente no intervalo entre os testes.

Para a camada de 0,1-0,2 m, o menor teor de água ocorreu no SEE, com $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e, o maior, no SDE, com $0,34$

$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sem diferença expressiva para os demais tratamentos. O maior teor de água do SDE discorda dos resultados de Zoldan Junior (2006). Provavelmente, este resultado explica-se pelo aumento da porosidade superficial do solo nos tratamentos escarificados, o que condicionou diminuição da condutividade térmica e da capilaridade, perdendo rapidamente a umidade na camada mais superficial e conservando a água na camada mais profunda. Além disso, a retenção de água nas depressões originadas pela escarificação manteve por mais tempo a umidade elevada nesta camada, principalmente após a ocorrência de chuvas naturais próximas em datas às de aplicação das chuvas simuladas.

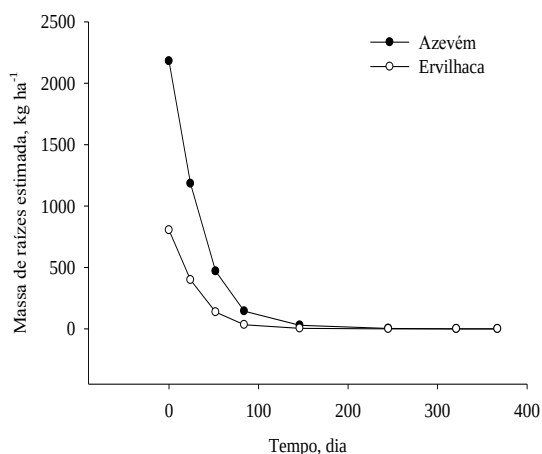
Temporalmente, aos 24 dias após o teste 1 de chuva se observou o menor teor de água no solo, com $0,28 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, enquanto aos 52 e 245 dias os maiores teores, com $0,32 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Apêndice B). Isto demonstra menor variação entre os testes na camada de 0,1-0,2 m em relação a camada de 0-0,1 m, com amplitudes de $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,04 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente. Isto deve-se à maior exposição da camada superficial à radiação solar e ao vento, mesmo quando coberto por resíduos culturais. Este comportamento pode ser observado nas figuras 13a e 13b, pois, até os 84 dias, houve grande variação entre os testes de chuva na camada de 0,1-0,2 m e, mesmo havendo variação na camada de 0-0,1 m, esta foi menor.

4.1.8 Massa de raízes estimada (MRE)

A maior massa de raízes no cultivo de azevém em relação à ervilhaca (Figura 14), concorda com o exposto por Dechen et al. (1981), Luciano et al. (2009), Barbosa et al. (2010) e Brandão & Silva (2012). Estes resultados influenciaram a estabilidade de agregados maior nos tratamentos com azevém, devido à influência sobre o teor de carbono orgânico. Também, influenciaram as perdas de solo, devido a maior resistência do solo a desagregação e ao sulcamento, conforme Dechen et al.

(1981), Luciano et al. (2009) e De Baets & Poelsen (2010). Observa-se que a diferença foi menor a partir dos 146 dias após o teste 1 de chuva (Figura 14), embora, as perdas de solo tenham sido mais expressivas, o que demonstra que a massa de raízes das gramíneas é extremamente eficiente em aumentar a resistência do solo a desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pela energia do escoamento concentrado (DECHEN et al., 1981; LUCIANO et al., 2009; DE BAETS & POESEN, 2010).

Figura 14 - Massa de raízes estimada para os tratamentos com cultivo de azevém e ervilhaca.



Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

A MRE no T1 de chuva demonstra que a cultura do azevém produziu mais que o dobro de raízes do que da ervilhaca, comportamento parecido até o teste 3 de chuva (52 dias) e, aos 84 dias, a diferença entre massa de raízes aumentou, devido a maior

resistência das gramíneas à decomposição e sua maior relação C/N, concordando com Gilmour et al. (1998) e Brandão & Silva (2012).

4.2 CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DO SOLO

Os resultados da análise estatística para as variáveis resposta rugosidade ao acaso do solo (RR), massa de resíduos culturais (MR), cobertura do solo por resíduos culturais (CS), bem como, de efeito dos testes de chuva sobre estas variáveis respostas e a interação entre as mesmas e os testes de chuva, estão expostos na Tabela 7. A RR, a CS, a MR, diferiram estatisticamente entre os tratamentos e entre os testes de chuva; ainda, houve interação entre RR, CS e os testes de chuva.

Tabela 7 - Resultados da análise estatística da variância pelo modelo MIXED correspondente aos cinco tratamentos, oito testes de chuva e interação entre os tratamentos e os testes para a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR), massa de resíduos culturais (MR) e porcentagem de cobertura do solo por resíduos culturais (CS), em um Cambissolo Húmico.

Fonte de variação	GL tratamentos com alta CS	GL tratamentos com alta RR	Significância ($p > F$)*		
			RR	MR	CS
Tratamento	1	2	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Teste	7	7	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Trat x teste	7	14	0,0051	0,4619	<0,0001

RR: índice de rugosidade ao acaso, MR: massa de resíduos, CS: cobertura do solo, GL: grau de liberdade. *: significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Rugosidade superficial do solo (RR)

Na média dos tratamentos, o valor de RR foi 4,1 mm antes do preparo, concordando com Bramorski et al. (2012) e Panachuki et al. (2010) e, após a escarificação, o valor aumentou para 17,5 mm (Apêndice C), semelhante ao encontrado por Zoldan Junior et al. (2008) e Correa et al. (2012), ambos sob condição de solo preparado com escarificador.

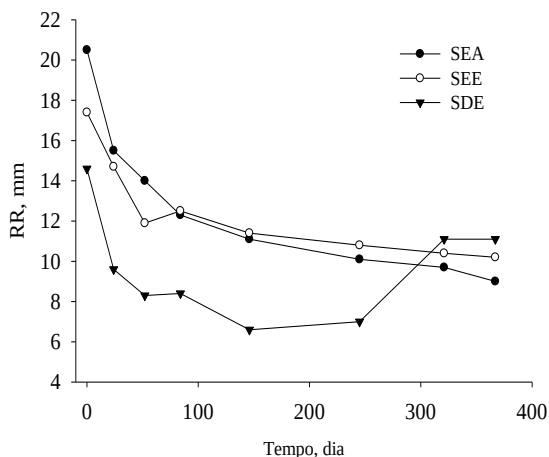
Após a escarificação, o maior valor de RR foi encontrado no SEA, 20,5 mm, seguido pelo SEE e SDE, com valores respectivos de 17,4 e 14,6 mm (Figura 15 e Apêndice C), concordando com valores obtidos por Bertol et al. (2008). Estes autores afirmaram que no solo descoberto e sem cultivo, a superfície apresenta torrões menores e em menor número, por consequência da desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pelo revolvimento constante do solo, influenciado ainda pela menor resistência dos agregados do solo, devido ao decréscimo do teor de matéria orgânica.

Na média dos testes de chuva simulada, a menor RR ocorreu no SDE, com valor médio de 9 mm, em relação à 12,2 mm no de SEA e SEE. O menor valor de RR após a aplicação de oito testes de chuva simulada (em 367 dias) no tratamento SDE em comparação aos demais foi devido à menor resistência do solo à desagregação, explicada pela diminuição do teor de carbono orgânico e de menor estabilidade de agregados (Tabela 6), em consequência da falta de cultivo em relação aos tratamentos cultivados. O cultivo do solo nos tratamentos SEA e SEE proporcionou maior teor de matéria orgânica e ação das raízes das culturas, conferindo resistência do solo à desagregação, conforme verificado também por Luciano et al. (2009) e Barbosa et al. (2010).

O decréscimo do índice RR foi maior após a aplicação do teste 1 de chuva (leitura feita 24 dias após o primeiro teste), com 25% da redução total de 47% até 367 dias após o teste 1 (Apêndice C). Estes resultados concordam com os verificados por Cogo (1981) e Zoldan Júnior et al. (2008). Segundo Römken & Wang (1986), a rápida diminuição da rugosidade

após a primeira chuva é devida à diminuição da porosidade e aumento do adensamento, devido à quebra e desagregação de torrões após o umedecimento e, em menor grau, pela deposição de sedimentos nas micro depressões e assentamento do solo.

Figura 15 - Rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

Individualmente, a diminuição da RR para os tratamentos SEA, SEE e SDE aos 24 dias após o teste 1 de chuva, foi respectivamente de 24, 16 e 34%. O maior decréscimo no SDE é explicado pelo fato do solo ter sido mantido constantemente descoberto e periodicamente revolvido, o que fez diminuir o teor de matéria orgânica e a resistência dos agregados à ação da água (Apêndice C), como verificado

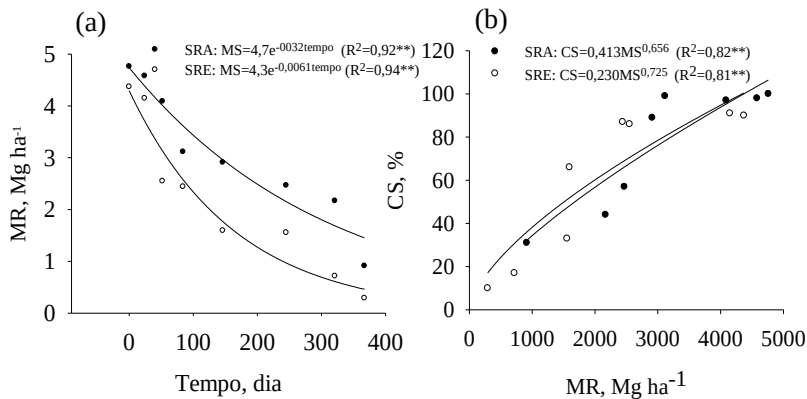
também por Bertol et al. (2006). A maior diminuição da RR no SEA em relação ao SEE, justifica-se, provavelmente, pela maior rugosidade inicial do SEA que no SEE, discordando do encontrado por Bertol et al. (2006). Estes autores observaram correlação entre a persistência dos agregados (DMP e DMG) com a persistência da rugosidade superficial do solo, cuja correlação foi melhor na aveia do que no milho.

O RR diminuiu do teste 1 ao teste 8 (367 dias após o início do experimento) nos tratamentos SEA e SEE, mas, no SDE, houve um leve aumento a partir dos 321 dias. Este aumento é explicado pela formação de sulcos na superfície do solo (visualizada durante a aplicação das chuvas). Segundo Paz-Ferreiro et al. (2008), estes sulcos são contabilizados no valor do índice RR pelo programa de cálculo.

4.2.2 Massa de resíduos culturais (MR) e cobertura do solo pelos resíduos (CS)

Após o manejo das culturas, os tratamentos SRA e SRE produziram valores relativamente altos de massa de resíduos, com 4,7 e 4,4 Mg ha⁻¹, respectivamente (Apêndice D), decorrente, provavelmente, das favoráveis condições climáticas ocorridas no período experimental e das adequadas condições físicas e químicas do solo. Aos 24 dias após o teste 1 de chuva simulada, a diminuição da massa residual dos tratamentos SRA e SRE foi pequena, respectivamente 4 e 5% da massa total inicial (Figura 16a), provavelmente, pelo pouco contato dos resíduos com a superfície do solo. Após 52 dias, o decaimento foi maior no tratamento SRE (37%) em relação ao SRA (15%) (Apêndice D), efeito este ocasionado pela menor relação C/N da ervilhaca em relação ao azevém, conforme Gilmour et al. (1998). O decaimento mais pronunciado da massa de resíduo do azevém aconteceu somente entre 321 e 367 dias após o teste 1, ou seja, um ano após o início do experimento, com uma perda de 26% de massa no referido intervalo.

Figura 16 - Relação entre a massa vegetal das culturas (MR) com o tempo, (a), e relação da cobertura do solo por resíduos culturais (CS) com a MR, (b), nos tratamentos cobertos por resíduos culturais, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

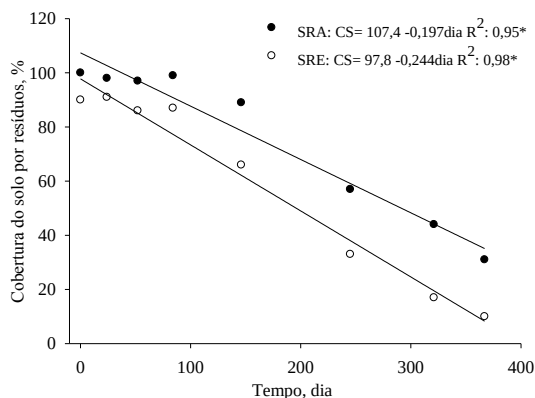
Fonte: Próprio autor.

O tratamento com resíduo de azevém (SRA) proporcionou 12% a mais de cobertura do solo do que com ervilhaca (SRE) no intervalo entre o teste 1 e o teste 4 (84 dias), variando de 20 a 25% no intervalo entre o teste 4 e o teste 8 (84 a 367 dias) (Figura 17 e Apêndice D). Esta diferença justifica-se pela maior quantidade de massa vegetal de azevém e pela sua decomposição mais lenta ao longo do tempo, conforme demonstrado na Figura 16(a), e constatado também por Gilmour et al. (1998). Ainda, segundo Lopes et al. (1987b), o maior número de peças do resíduo cultural de azevém em relação ao de ervilhaca, para a mesma massa vegetal, faz com que o azevém tenha maior capacidade de cobrir o solo, podendo ser comprovado pelas equações potenciais

correlacionando a porcentagem de cobertura do solo com a massa de resíduos (Figura 16b).

Ao observarmos a Figura 17, notamos o decaimento temporal entre as duas culturas. Independentemente do tempo, a cultura do azevém (tratamento SRA) manteve maior cobertura do solo, concordando com Gilmour et al. (1998). Nota-se que, a inclinação da reta do tratamento SER é maior, demonstrando um decaimento temporal maior da cobertura do solo.

Figura 17 - Relação entre a cobertura do solo (CS) com o tempo para os tratamentos SRA e SRE.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.3 PARÂMETROS RELACIONADOS À ENXURRADA

Os valores de probabilidade (valor p) para os tratamentos (Trat), testes de chuva (T) e interação entre os fatores (Trat x T) para o tempo de início de escoamento (TI), perdas de solo (PS), perdas de água (PA), taxa constante de infiltração de água no solo

(TCI) concentração de sedimentos na enxurrada (CS), velocidade de escoamento (VE), índice D_{50} dos sedimentos (D_{50}), profundidade total do fluxo (Y), tensão cisalhante da enxurrada (τ), coeficiente de rugosidade de Manning (nr) bem como o efeito de T sobre estas variáveis respostas e a interação entre as mesmas e T, estão expostos no Tabela 8. Com exceção do Y e nr, todas as variáveis diferiram estatisticamente entre Trat, e a TCI e Y não diferiram entre T. Ainda, com exceção da PA, TCI, Y e τ , os demais resultados apresentaram interação entre Trar x T.

Tabela 8 - Valores de p pelo DMS de Fisher para os fatores tratamentos (Trat), testes de chuva simulada (T) e interação (Trat x T) para alguns parâmetros relacionados à enxurrada, em um Cambissolo Húmico.

Fonte de variação	Gl*	Significância (p > F)*									
		TI	OS	PA	TCI	CSE	VE	D_{50}	Y	τ	nr
Trat	4	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0005	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,3148	<0,0005	0,1458
T	7	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,77	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,5885	<0,0001	<0,0001
Trat x T	28	<0,0001	<0,0001	0,5141	0,99	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,7252	0,2207	<0,0001

TI: tempo de início de escoamento, PS: perdas de solo, PA: perdas de água, CSE: concentração de sedimentos na enxurrada, VE: velocidade da enxurrada, D_{50} : índice D_{50} dos sedimentos, Y: profundidade total do fluxo, τ : tensão cisalhante da enxurrada, nr: coeficiente de rugosidade de Manning, GL: graus de liberdade. *Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p>0,05$).

Fonte: próprio autor.

Os valores médios dos oito testes de chuva simulada de cada tratamento para as variáveis respostas TI, PS, PA, CSE, VE, D_{50} , Y, τ e nr, estão expostos no Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios dos parâmetros relacionados à enxurrada de cada tratamento após oito testes de chuva simulada, em um Cambissolo Húmico.

Tratamentos	Variáveis									
	PS	PA	TCI	VE	D ₅₀	CSE	Y	τ	nr	
	TI min	Mg ha ⁻¹	% chuva	mm h ⁻¹	m s ⁻¹	mm	g l ⁻¹	m	N ⁻²	-
SRA	18	2,93	50	16	0,063	0,18	0,47	0,0017	2,20	0,148
SRE	11	31,21	59	12	0,086	0,81	5,20	0,0015	2,01	0,105
SEA	13	33,57	65	11	0,108	0,75	6,66	0,0015	2,02	0,115
SEE	9	71,62	66	10	0,132	1,09	14,55	0,0013	1,70	0,097
SDE	12	72,27	63	10	0,190	1,56	15,23	0,0005	0,69	0,012

(TI) tempo de início de escoamento; (PS) perdas de solo; (PA) perdas de água; (CSE) concentração de sedimentos na enxurrada; (VE) velocidade da enxurrada; (D₅₀) índice D₅₀ dos sedimentos contidos na enxurrada; (Y) profundidade total do fluxo; (τ) tensão cisalhante da enxurrada e; (nr) coeficiente de rugosidade de Manning SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

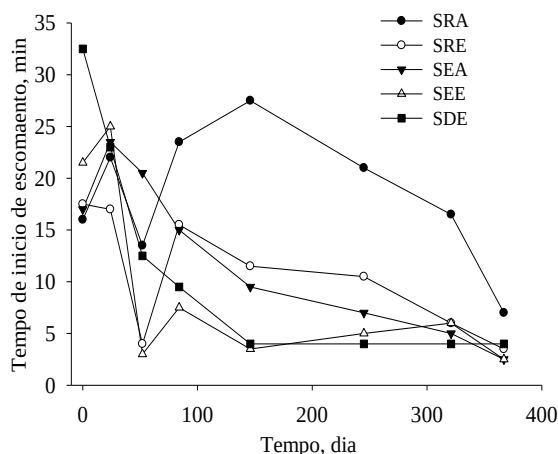
Fonte: Próprio autor.

4.3.1 Tempo de início de escoamento (TI)

O tratamento SRA foi o mais eficaz em retardar o início do escoamento (Tabela 9), com tempo de 18 minutos, comparado a média de 11,3 minutos dos demais tratamentos, concordando com Mannering & Meyer (1962). Estes autores afirmaram que os resíduos culturais sobre a superfície do solo têm a habilidade de armazenar água e aumentar a infiltração no solo. Entretanto, Bertol et al. (2006), observaram influência positiva da rugosidade superficial em retardar o escoamento devido ao armazenamento nas depressões criadas pelo preparo e à maior infiltração de água no solo. O efeito benéfico do SRA pode ser observado na Figura 18, onde o TI manteve-se acima

dos demais tratamentos a partir dos 84 dias até os 367 dias, demonstrando um efeito temporal maior do resíduo de azevém em relação aos demais tratamentos.

Figura 18 - Tempo de início de escoamento nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

Embora o TI do SEE tenha sido semelhante ao do SRE e SDE, o menor valor ocorreu no SEE (Tabela 9). Tais resultados discordam dos encontrados por Bertol et al. (2008), onde o solo sem cultivo escarificado foi o menos eficaz em retardar o escoamento, quando comparado aos solos cultivados escarificados. Tais autores atribuíram a maior eficiência do solo cultivado à maior estabilidade dos agregados proporcionada

pelo cultivo que manteve a porosidade ao longo do tempo e infiltração do solo.

Temporalmente, o menor TI ocorreu aos 367 dias após o teste 1 de chuva, enquanto, o maior ocorreu aos 24 dias após o teste 1 (Ap. Tal comportamento era esperado, devido a diminuição da cobertura do solo e da rugosidade superficial do solo no decorrer do tempo, proporcionando, desta forma, formação de crosta sobre a superfície do solo, conforme destacado por Duley (1939) e Bertol et al. (1989). A crosta diminui drasticamente a infiltração de água no solo, condicionando rápido início de escoamento. Na Figura 18, observa-se a tendência dos tratamentos em diminuir o TI com o passar do tempo, para todos os tratamentos, com um caimento menos acentuado no tratamento SRA em relação aos demais.

Na média dos manejos do solo, o escoamento levou 11 minutos para iniciar. Dentre as culturas, o azevém foi mais eficaz do que a ervilhaca em retardar o escoamento, independentemente do manejo, levando 55% a mais de tempo em comparação aos 10 minutos da cultura da ervilhaca.

Embora o TI tenha apresentado um comportamento decrescente com o passar dos testes, nota-se grande variação nos tratamentos, como reflexo da amplitude do teor de água no solo antecedente às chuvas, conforme exposto nas Figuras 13.

4.3.2 Perdas de solo (PS)

As PS foram menores no SRA ($2,93 \text{ Mg ha}^{-1}$) seguidas pelo SRE e SEA, com valores de $31,21$ e $33,57 \text{ Mg ha}^{-1}$, e pelo SEE e SDE, com valores de $71,62$ e $72,27 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabela 9).

As menores PS do tratamento SRA em relação aos demais se devem ao efeito protetor do solo pelo resíduo cultural do azevém que dissipou a energia cinética das gotas de chuva e da enxurrada, reduzindo sua capacidade de desagregação e transporte das partículas de solo. Além disso, os resíduos provavelmente funcionaram como um filtro, retendo os

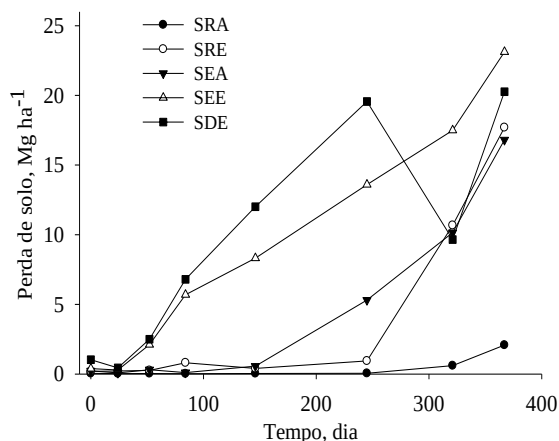
sedimentos e evitando seu transporte para fora da área, concordando com Mello et al. (2003), em cujo trabalho as perdas de solo sob semeadura direta foram inferiores às dos tratamentos que receberam preparo do solo. Este efeito protetor do resíduo de azevém no tratamento SRA prolongou-se até os 245 dias após o teste 1 de chuva simulada e, a partir daí, sua eficiência foi diminuída, possivelmente, pela redução da massa de resíduo e da cobertura do solo (Figura 16a e Figura 17).

Ao se observar a Figura 19, nota-se que todos os tratamentos com exceção do SRA apresentaram PS elevadas entre 52 e 245 dias após o teste 1 de chuva. Antagonicamente, o tratamento SDE apresentou uma diminuição aos 321 dias (aumentando novamente aos 367 dias após o teste 1), explicado pelas altas perdas de solo ocorridas neste tratamento antes desta data, refletindo-se em baixa carga de sedimentos prontamente disponíveis para o transporte, concordando com Luciano (2008). Comparando os valores médios de PS do teste 1 ao teste 8 de chuva (367 dias após o teste 1), encontra-se um aumento de 43 vezes entre eles (Apêndice E), o que comprova a perda da eficiência dos resíduos culturais e da rugosidade superficial na proteção do solo à erosão.

As PS foram maiores no tratamento SRE do que no SRA em todos os testes de chuva, cuja diferença foi 10,6 vezes no total do período experimental. Essa diferença explica-se pela maior capacidade do resíduo de azevém em cobrir o solo. Estes dados concordam também com Lopes et al. (1987a), os quais, trabalhando com resíduos de trigo, milho e soja, verificaram eficácias distintas destes resíduos em reduzir a erosão hídrica, com menores perdas encontradas no trigo, seguido pelo milho e soja. A justificativa foi de que o resíduo de trigo tinha maior número de peças do que os outros resíduos para a mesma massa, mantendo maior contato com a superfície do solo e, com isso, cobrindo mais a superfície e filtrando os sedimentos com maior eficácia. Além disso, as raízes do azevém foram mais eficientes na estruturação do solo do que as de ervilhaca, conforme foi

constatado por Dechen et al. (1981) e Luciano et al. (2009). De Baets & Poesen (2010) constataram que a maior densidade de raízes confere ao solo maior resistência ao sulcamento pela erosão, resultando em menor erodibilidade do solo.

Figura 19 - Perdas de solo nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

O tratamento SEA apresentou menor PS ($33,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) do que o SEE ($71,62 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tabela 9), mesmo sem diferença quanto a rugosidade superficial (Apêndice C). A diferença de PS justifica-se pela diferença de agregação e ação das raízes, concordando com De Baets & Poesen (2010) e Barbosa et al. (2010). Estes autores afirmam que as gramíneas têm maior capacidade do que as leguminosas de agregar o solo na camada

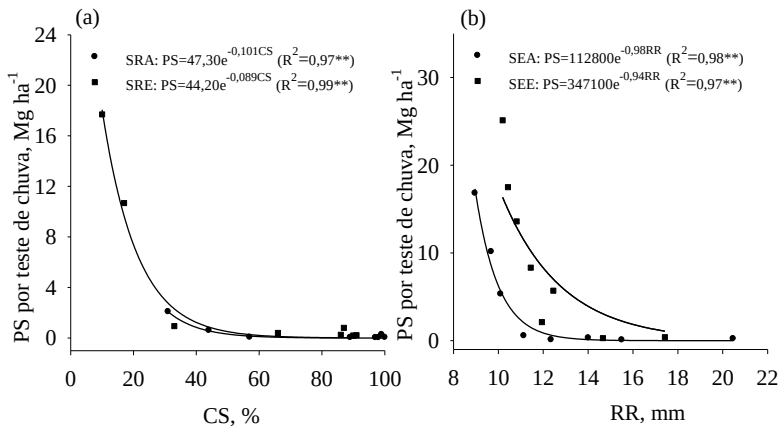
superficial onde se concentram as raízes, diminuindo a quantidade e o diâmetro dos sedimentos erodidos.

As maiores PS ocorreram no SEE e SDE, com valores de 71,62 e 72,3 Mg ha⁻¹, respectivamente no total, ou seja, 25 vezes maiores do que aquela verificada no SRA (2,93 Mg ha⁻¹). A elevada PS no SDE é explicada pela baixa resistência do solo à erosão, consequência da inexistência de cultivo e cobertura do solo, concordando com Schick et al. (2000) e Mello et al. (2003). Segundo Bertol et al. (2008), o cultivo do solo tem efeito positivo na conservação do solo, devido a sua influência na agregação, resistência e proteção do solo, pois, mesmo quando incorporados, os resíduos contribuem para a sua agregação. Na ausência de cultivo, há uma diminuição gradativa da matéria orgânica e atividade biológica do solo, refletindo em menor estabilidade dos agregados e tornando o solo mais suscetível a erosão. A mesma argumentação serve para o tratamento SEE, pois, a superfície do solo apresentava baixa cobertura. Além disso, as raízes da ervilhaca são pouco eficientes na agregação do solo, pois apresentam pouca massa e rápida decomposição. Assim, em um solo pouco coberto e com baixa resistência, as gotas de chuva, ao impactarem a superfície, diminuem a rugosidade, selam a superfície, formando sulcos rapidamente onde a enxurrada aumenta o volume e a velocidade (BERTOL et al., 1989).

A Figura 20 demonstra a relação entre as PS com a cobertura por resíduos culturais (a) e com a rugosidade superficial ao acaso (b). Ambas as condições de superfície correlacionaram-se inversamente com as PS (coeficiente de determinação entre 97 e 99%). Nota-se que, independentemente da condição de superfície, a cultura do azevém foi a mais eficiente na proteção à erosão hídrica, devido a maior capacidade das gramíneas em cobrir o solo por meio dos resíduos da parte aérea (LOPES et al., 1987a) e de estruturar e aumentar a capacidade do solo em resistir a desagregação por meio das raízes (DECHEN et al., 1981; BARBOSA et al. 2010; BRANDÃO & SILVA 2012).

Ainda, na Figura 20, observa-se a maior importância das raízes na resistência do solo nas PS em um solo rugoso, pois, estas perdas foram distintas nos tratamentos em situações de rugosidade similar. Ao contrário deste comportamento, no geral, as PS nos tratamentos cobertos por resíduos mantiveram-se baixas e similares quando com coberturas semelhantes do solo, concordando com Norton et al. (1985), pois a cobertura do solo é mais importante para explicar as PS do que a rugosidade superficial.

Figura 20 - Relação temporal das perdas de solo (PS) com a cobertura por resíduos culturais (CS), (a), e relação das PS com a rugosidade superficial ao acaso (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes e; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes.

Fonte: Próprio autor.

4.3.3 Perdas de água (PA)

As PA no SRA foram as menores em comparação aos demais tratamentos (Tabela 9), representando 50% do volume de chuvas aplicadas. A semelhança de PA para a maioria dos tratamentos estudados justifica-se pela uniformidade de teor de água no solo antecedente às chuvas simuladas aplicadas (Apêndice E) e, principalmente, pela limitada capacidade de infiltração de água do solo estudado, que, quando submetido a chuvas intensas e de longa duração, a taxa de enxurrada tende a se igualar em todos os tratamentos, inibindo os efeitos dos mesmos na enxurrada, conforme argumentado por Schick et al. (2000). Em um solo saturado, quem rege a infiltração de água no solo é o potencial matricial, sendo esta uma característica do solo e não do manejo.

Dentre os tratamentos cobertos por resíduos culturais, a maior eficiência do SRA (Tabela 9), com PA de 50%, em relação ao SER, com PA de 59%, deve-se à maior capacidade das gramíneas em reduzir a erosão, pois, além de produzirem maior quantidade de resíduos, têm maior capacidade de reestruturação do solo devido a melhor produção e distribuição de seu sistema radicular, tornando-o mais resistente à desagregação pelo impacto das gotas da chuva e enxurrada associada, resultando em menores perdas, concordando com Dechen et al. (1981), porém, discordando dos valores encontrados por Luciano et al. (2009).

As PA dos tratamentos SRA e SRE foram 16% menores na média dos testes de chuva (Tabela 9) em comparação aos tratamentos em que o solo foi escarificado (SEA, SEE e SDE). Isto demonstra maior eficiência dos resíduos culturais mantidos na superfície, na condição sem preparo do solo, em reduzir as perdas de água em relação à condição em que o solo foi preparado por uma escarificação. Estes dados concordam com o exposto por Schick et al. (2000), onde a semeadura direta perdeu menos água do que o solo revolvido mecanicamente, e

contrastam com os resultados de Mello et al. (2003). Ainda, Cogo (1981) encontrou que a escarificação do solo com os resíduos proporcionou menor perda de água do que os tratamentos com resíduos sobre a superfície. Um indicativo de que a escarificação do solo não influenciou as perdas de água é a sua não influência em retardar o início do escoamento conforme destacado anteriormente.

Dentre os tratamentos escarificados, a menor PA ocorreu no SDE (Tabela 9). Provavelmente, isto foi devido ao solo ter sido revolvido frequentemente com aração nos trabalhos anteriores e depois escarificado imediatamente antes de iniciar as chuvas deste trabalho. Entretanto, Bertol et al. (2008) verificaram perdas inferiores de água em um solo sem cultivo, descoberto e escarificado em comparação à outros tratamentos em que o solo foi cultivado e escarificado.

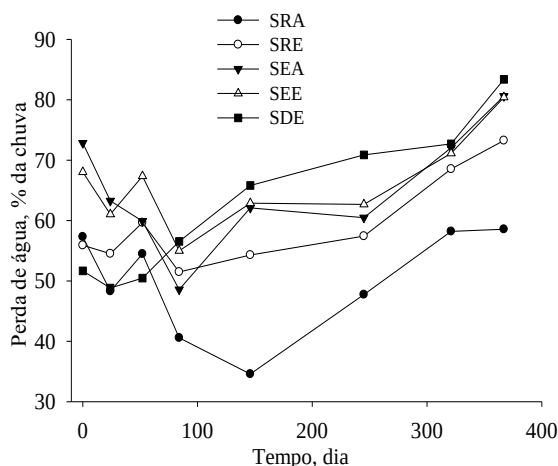
As PA tenderam a aumentar com o passar dos testes de chuva (Figura 21), ressaltando-se o efeito do teor de água no solo antecedente às chuvas. Nota-se que, inicialmente, houve variação maior das PA para todos os tratamentos. Tais resultados podem estar ligados ao efeito do teor de água no solo antecedente às chuvas juntamente com o efeito de tratamento, pois a partir do momento que os tratamentos passaram a perder sua influência, o efeito da umidade também diminuiu sua influência nas PA.

Na Figura 21 se observa que as PA no tratamento SRA mantiveram-se menores que nos demais tratamentos a partir dos 84 dias após o teste 1 de chuva. A tendência de aumento de PA para todos os tratamentos foi devida à diminuição da cobertura por resíduos nos tratamentos em que os resíduos foram mantidos na superfície do solo, à diminuição da rugosidade superficial nos tratamentos em que o solo foi escarificado e, principalmente, devido ao selamento superficial no solo, independente se o solo é descoberto conforme demonstrado por Bertol et al. (1989), ou coberto por resíduos, segundo Dalla Rosa et al. (2013b).

O resíduo de azevém mantido sobre a superfície do solo no tratamento SRA, propiciou menores PA do que o resíduo de

ervilhaca no SRE. No entanto, não houve influência das raízes das culturas para as PA nos tratamentos em que o solo foi escarificado, concordando com Laflen & Colvin (1981). Estes autores demonstraram que distintos preparos de solo influenciam mais as perdas de água do que diferentes resíduos culturais.

Figura 21 - Perdas de água dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.3.4 Taxa constante de infiltração de água no solo (TCI)

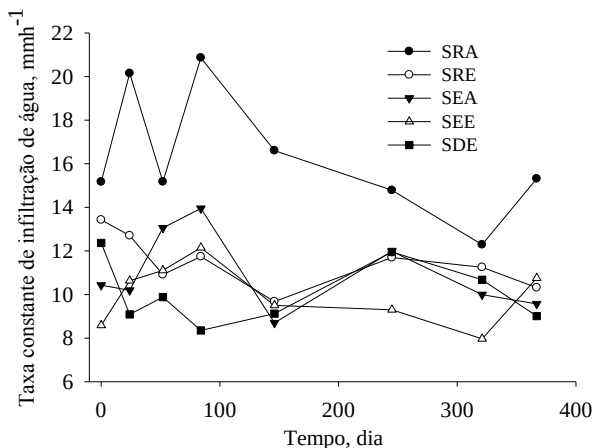
Entre todos os tratamentos, o maior valor de TCI foi calculada no tratamento SRA, com valor de 16 mm h^{-1} , contra 11 mm h^{-1} no SRE e SEA, e 10 mm h^{-1} no SEE e SDE (Tabela 9). Tais

resultados estão de acordo aos encontrados por Alves & Cabeda (1999) em um Argissolo e Andrade et al. (2010) em um Cambissolo Húmico. Estes autores encontraram maiores valores de TCI sob semeadura direta do que sob preparo convencional, relacionando tais resultados ao efeito combinado dos resíduos de culturas sobre a superfície do solo com uma rede contínua e profunda de macroporos que podem aumentar a condutividade hidráulica do solo sob semeadura direta (CAVALIERI et al., 2009). Entretanto, Bertol et al. (2001), obtiveram maiores taxas constantes de infiltração no preparo convencional, e não na semeadura direta, condicionando tais resultados ao maior volume de macroporos e menor valor de densidade deste tratamento, efeito este do preparo do solo.

A infiltração de água no solo está de acordo com os resultados de perdas de água, ou seja, menores no SRA em relação aos demais (Tabela 9 e Figura 22). A TCI é importante, uma vez que define a disponibilidade de água para as plantas, reposição do lençol freático e, indiretamente, reflete na taxa de enxurrada. Nota-se que, embora com diferença pequena, a cultura do azevém, independentemente do manejo, influenciou positivamente a infiltração de água no solo, concordando com Leite et al. (2004), Luciano et al. (2009) e Bertol et al. (2015) que encontraram infiltrações distintas em diferentes cultivos do solo.

Temporalmente, observa-se a maior TCI no tratamento SRA em todos os testes de chuva (Figura 22), com menor diferença nos demais tratamentos entre si, demonstrando uma menor dependência dessa variável do manejo do solo. Isto explica-se devido à limitada capacidade de infiltração de água deste solo, conforme argumentado por Schick et al. (2000), Ramos et al. (2014) e Bertol et al. (2015).

Figura 22 - Taxa constante de infiltração de água no solo dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.3.5 Velocidade da enxurrada (VE)

Com $0,063 \text{ m s}^{-1}$, a menor VE ocorreu no tratamento SRA (Tabela 9) e, a maior, com $0,190 \text{ m s}^{-1}$, no SDE. A menor VE no SRA, explica-se, pela formação de barreiras físicas dos resíduos, aumentando a tortuosidade do fluxo, conforme constatado também por Leite et al. (2004). A redução da VE é importante, uma vez que ela exerce grande influência na energia final do escoamento e, conseqüentemente, na sua capacidade de desagregar e transportar partículas maiores de solo (CASSOL et al., 2004; BERTOL et al., 2010). A menor eficiência do tratamento SDE no controle da VE deve-se à baixa resistência do solo à desagregação, resultando em rápido alisamento e

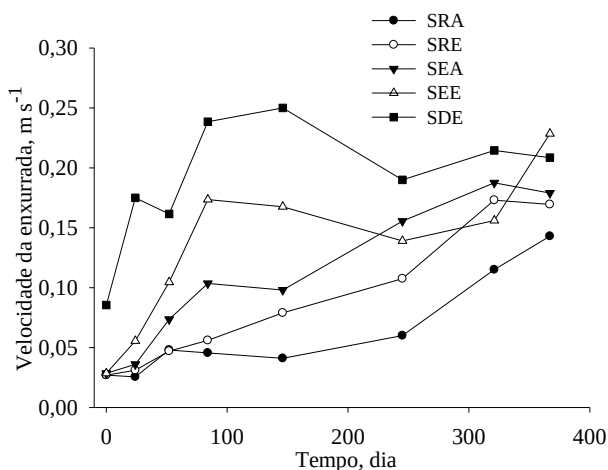
selamento da superfície do solo e formação de sulcos que, por sua vez, permitiu o livre escoamento da enxurrada (BERTOL et al., 2006).

Temporalmente, os resíduos culturais sobre a superfície do solo (tratamentos SRA e SRE) foram mais eficazes do que a rugosidade provocada pela ação do escarificador (tratamentos SEA, SEE e SDE) na diminuição da VE (Figuras 23, 24a e 24b). Na média dos tratamentos, a redução foi de 48% nos tratamentos com resíduos em relação aos tratamentos com escarificação. Isto se deve à maior eficácia das barreiras físicas dos resíduos do que a ação da rugosidade no controle do escoamento superficial, aumentando a tortuosidade do fluxo, conforme verificado também por Lopes et al. (1987b) e Leite et al. (2004).

Dentre os resíduos, o azevém no tratamento SRA, foi mais eficiente do que a ervilhaca (SER), diminuindo 27% a VE (Tabela 9). Isto concorda com Lopes et al. (1987b) que observaram diferença entre as culturas de milho, trigo e soja na diminuição da VE. Os autores justificaram tal diferença pelo número de peças para uma mesma quantidade de resíduo, fato este comprovado pela percentagem de cobertura do solo em ambos os tratamentos, com massa de resíduos similares. Ainda, no SRA, a decomposição do resíduo foi mais lenta, condicionando maior percentagem de cobertura do solo ao decorrer do tempo (Figura 17 e Apêndice D).

Comparando os tratamentos em que o solo foi escarificado, os menores valores de VE foram constatados naqueles em que o solo foi cultivado. Nos tratamentos SEA e SEE, o valor foi, na média, 37% menor do que no SDE (Tabela 9). Justifica-se tal resultado, pela maior rugosidade ao acaso mantida ao longo do tempo nos tratamentos com cultivo, em relação ao SDE. A maior rugosidade gerou maior tortuosidade a qual se manteve ao longo do tempo no solo cultivado e escarificado, retardando o escoamento, concordando com Volk & Cogo (2009).

Figura 23 - Velocidade de enxurrada dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.

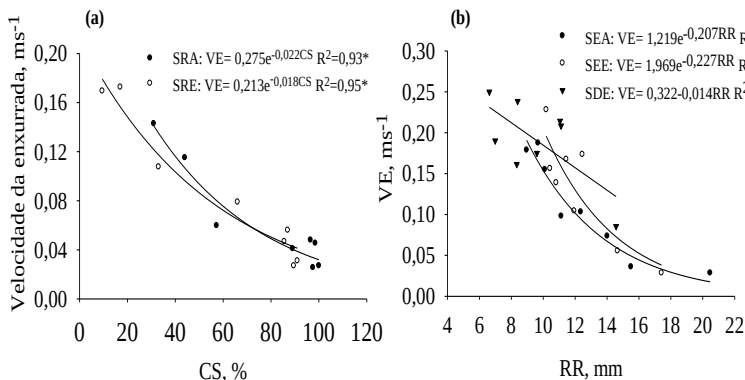


SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

Verificou-se maior eficácia dos tratamentos com cobertura do solo do que os escarificados no controle da VE (Figura 24). Em geral, o ajuste do modelo exponencial foi melhor para os dados dos tratamentos com resíduos (Figura 24a) do que dos tratamentos com escarificação (Figura 24b). No solo sem cultivo (SDE), o modelo linear ajustou-se fracamente aos dados. O aumento do sulcamento do solo nos tratamentos escarificados, principalmente no SDE, foi contabilizado no valor calculado da rugosidade, conforme constatado também por Paz-Ferreiro et al. (2008). Isso contribuiu para a menor correlação das variáveis nesses tratamentos em relação àqueles com a presença de resíduos culturais na superfície do solo.

Figura 24 - Relação da velocidade da enxurrada (VE) com a cobertura do solo (CS), (a), e da VE com a rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

4.3.6 Índice D₅₀ dos sedimentos transportados na enxurrada (D₅₀)

O menor valor de índice D₅₀ dos sedimentos ocorreu no tratamento SRA, igual a 0,18 mm na média dos testes de chuva (Tabela 9), resultado do efeito protetor do resíduo de azevém que dissipou a energia cinética das gotas de chuva e evitou a desagregação do solo. Contribuiu para isso o não revolvimento mecânico nesse tratamento. O resíduo cultural reduziu a velocidade da enxurrada e aumentou a deposição dos sedimentos e, ainda, filtrou os sedimentos maiores e mais densos, segundo constatado também por Lopes et al. (1987a), Cassol et al., 2004

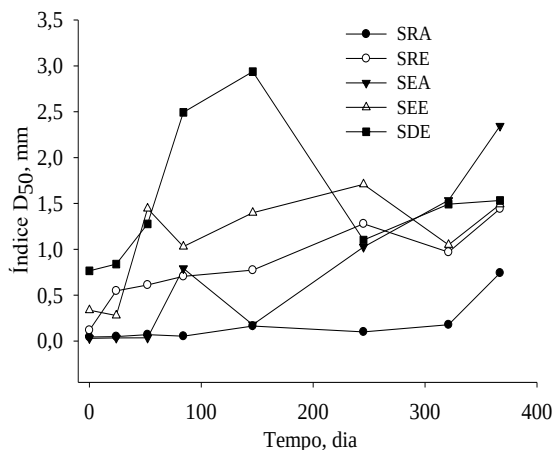
e Leite et al. (2004). Entretanto, vale destacar que os sedimentos de menor tamanho transportados na enxurrada, os quais predominam nos preparos conservacionistas de solo, são, em geral, mais ricos em nutrientes e carbono orgânico do que os sedimentos mais grosseiros provenientes dos métodos convencionais de preparo do solo (FOSTER et al., 1985; KUHN et al., 2012).

O maior valor de índice D_{50} dos sedimentos ocorreu no tratamento SDE (média de 1,56 mm). Este valor é nove vezes maior que o 0,18 mm do SRA (Tabela 9), resultado da ação do resíduo de azevém sobre o solo neste último tratamento, e da maior fragilidade física do solo e da grande quantidade de sedimentos desagregados e prontamente disponíveis ao transporte no SDE. A ausência de cultivo proporcionou menor DMG ao solo, aumentando o desprendimento e transporte de partículas maiores ou micro agregados no SDE, concordando com Barbosa et al. (2010) e De Baets & Poesen (2010). Ainda, a ausência de cobertura permitiu o selamento da superfície do solo e a rápida formação de sulcos, acarretando em maior velocidade de escoamento neste tratamento, conforme observado também por Bertol et al. (2010).

Na figura 25, observa-se o comportamento temporal do D_{50} em cada tratamento. No tratamento SRA o valor do D_{50} manteve-se abaixo dos demais, em praticamente todos os testes de chuva. Igualmente, observa-se que, entre os 84 e 146 dias após o teste 1, o D_{50} do tratamento SDE foi duas vezes maior que a média dos demais tratamentos.

Houve comportamento crescente do D_{50} nos tratamentos, com exceção do SDE, onde o D_{50} diminuiu a partir dos 146 dias (Figura 25). Esse comportamento, explica-se, provavelmente, devido a diminuição do efeito protetor inicial da rugosidade, além da grande carga de sedimentos prontamente disponíveis gerados pelo preparo, que foi transportada com maior facilidade pela enxurrada nas chuvas iniciais, concordando com o exposto por Luciano (2008).

Figura 25 - Índice D_{50} dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

O D_{50} de 0,81 mm do tratamento SRE foi semelhante ao 0,75 mm do SEA (Tabela 9), na média dos testes de chuva, discordando dos resultados de Lopes et al. (1987a). Estes autores constataram que os resíduos têm a habilidade de filtrar os sedimentos de maior diâmetro presentes no fluxo e diminuir a velocidade e o volume da enxurrada em relação ao solo preparado sem cobertura. Essa semelhança deve-se a maior agregação do solo ocasionada pelas raízes de azevém, no caso do SEA, segundo Dechen et al. (1981) e Luciano et al. (2009), e da menor eficiência dos resíduos de ervilhaca, no caso do SRE, conforme Barbosa et al. (2010).

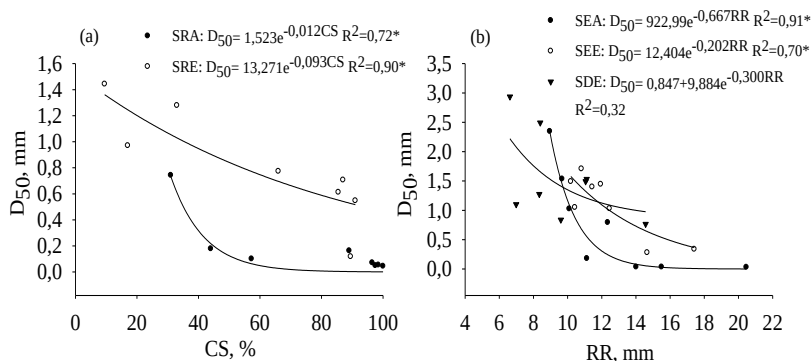
Independentemente do manejo, o azevém proporcionou menores valores de D_{50} do que a ervilhaca, diminuindo em 51% o D_{50} em relação à ervilhaca quando os tratamentos são agrupados por tipo de cultivo e, quando considerados separadamente, o SRA e o SEA diminuíram o D_{50} em 80% e 46% em relação ao SRE e SEE, respectivamente. Lopes et al. (1987a), não encontraram diferença no D_{50} ao comparar tratamentos com resíduos de trigo, milho e soja sob diferentes manejos. Entretanto, Barbosa et al. (2010) em um estudo com os cultivos de aveia e ervilhaca, constataram que a aveia propiciou menores valores de D_{50} do que a ervilhaca, independente do sentido da semeadura, atribuindo o menor D_{50} na aveia à maior agregação do solo na camada superficial devido sua alta densidade de raízes finas, estando de acordo com Dechen et al. (1981) e com De Baets & Poesen, (2010).

A relação do D_{50} com a cobertura e rugosidade superficial do solo (Figura 26) foi exponencial inversa, concordando com as relações observadas por Cogo et al. (1983) e Leite et al. (2004). Para os tratamentos com resíduos na superfície, SRA e SRE, os respectivos coeficientes de determinação foram de 0,72 e 0,90 (Figura 6a). Já para os tratamentos escarificados, SEA, SEE e SDE, os referidos coeficientes foram de 0,91, 0,70 e 0,32 (Figura 6b), respectivamente. O menor coeficiente de determinação do SDE justifica-se pelo aumento da rugosidade superficial do solo a partir do teste 7 de chuva, conforme discutido anteriormente.

As equações exponenciais das relações com os dados dos tratamentos SRA e SRE apresentaram menor fator “b” em relação aos tratamentos SEA, SEE e SDE (Figura 26). Isto significa que, para a menor alteração na rugosidade ao acaso, houve maior alteração no valor do D_{50} , explicando o melhor efeito temporal dos tratamentos com resíduos de azevém e ervilhaca (Figura 26a) do que os tratamentos com rugosidade superficial (Figura 26b), em filtrar os sedimentos maiores. Justifica-se: o preparo do solo, mesmo pouco intenso, com

escarificador, além de desagregar o solo, o expôs ao impacto das gotas de chuva e, principalmente, predis pôs a camada superficial ao sulcamento pela ação da enxurrada, como verificado por Leite et al. (2004). Isto praticamente não ocorreu nos tratamentos em que foram mantidos os resíduos culturais na superfície e sem preparo do solo (SRA e SRE).

Figura 26 - Relação do D_{50} com a cobertura do solo (CS), (a), e do D_{50} com a rugosidade superficial do solo (RR), (b), em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.



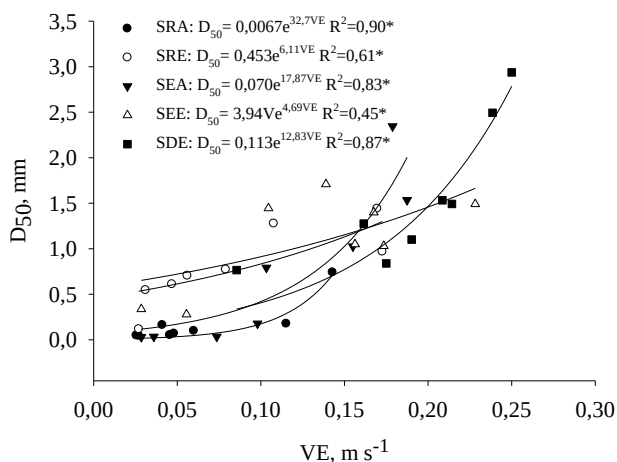
SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

Independente do tratamento, o aumento do índice D_{50} correlacionou-se exponencialmente com o aumento da VE (Figura 27), o que demonstra que a VE teve sua capacidade de transporte de sedimentos potencializada, concordando com Cogo et al. (1983) e Leite et al. (2004). O grau de ajuste dessas variáveis foi maior nos tratamentos SRA e SEA, em que o D_{50} foi explicado pela VE respectivamente em 90 e 83%, do que nos SRE e SEE, e a explicação do referido índice foi respectivamente em 61 e 45%. O menor

coeficiente de inclinação da curva de ajuste dos dados no tratamento SRA do que no SRE, confirma que o resíduo de azevém foi mais eficaz do que o de ervilhaca, na diminuição do D_{50} . A mesma lógica se observa ao se comparar os valores desse coeficiente dos dados dos tratamentos SEA e SEE, em que a escarificação realizada no solo cultivado com azevém (SEA) foi mais eficaz do que com ervilhaca (SEE) na diminuição do D_{50} . No solo sem cultivo (SDE) também foi elevado o grau de ajuste dessas variáveis, onde o índice D_{50} dependeu 87% da VE.

Figura 27 - Relação do índice D_{50} (D_{50}) com a velocidade da enxurrada (VE), nos tratamentos estudados, em cada teste de chuva, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

4.3.7 Concentração de sedimentos na enxurrada (CSE)

A menor CSE ocorreu no tratamento SRA (Tabela 9), 0,47 g L⁻¹, seguida dos tratamentos SRE e SEA (5,20 e 6,66 g L⁻¹, respectivamente), enquanto, os maiores valores foram encontrados nos tratamentos SEE e SDE, com concentrações respectivas de 14,55 e 15,23 g L⁻¹, concordando com os resultados de Mello et al. (2003) e Leite et al. (2004). Estes autores observaram que os resíduos culturais na superfície foram eficientes na diminuição da CSE em relação ao solo descoberto. Entretanto, Mello et al. (2003), em um Nitossolo, encontraram diferenças maiores, pois em um solo sem cultivo, a concentração de sedimentos foi 60 vezes maior que sob semeadura direta, demonstrando que a rugosidade criada pela escarificação no SDE, mesmo sendo a menor dentre os solos escarificados, afetou positivamente a concentração de sedimentos.

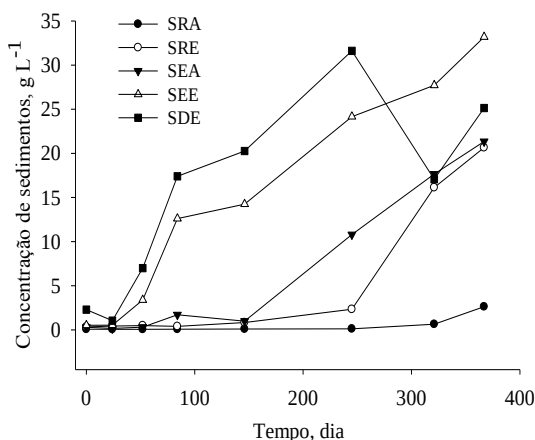
A CSE foi semelhante entre os tratamentos SRE e SEA, embora numericamente tenha ocorrido diferença de 22% (Tabela 9). Isso demonstra que o efeito de agregação do solo pelas raízes do azevém no tratamento SEA foi menor do que o efeito de proteção da superfície do solo pelo resíduo da ervilhaca no tratamento SRE. Além disso, houve sulcamento do solo no tratamento escarificado, o que contribuiu para desenvolver erosão em sulcos, com consequente geração de sedimentos de maior diâmetro neste tratamento, conforme verificado também por Braida & Cassol (1999) e Cassol et al. (2004).

Comparando os tratamentos com resíduos culturais na superfície do solo, a CSE foi 90% menor no SRA do que no SER (Tabela 9), diferença esta, similar a encontrada por Braida & Cassol (1999) ao comparar os resíduos culturais de trigo e milho, em que o resíduo de trigo, por ter maior número e menor tamanho de peças do que o milho, foi mais eficaz na redução da erosão do solo. Dentre os tratamentos com escarificação, a menor CSE foi do SEA (6,66 g L⁻¹), com uma diferença de mais de duas vezes para a média do SEE e SDE (14,9 g L⁻¹). Isso mostra que o cultivo do solo com uma gramínea proporcionou maior agregação do solo, conforme

constatado por Luciano et al. (2009) e Brandão & Silva (2012), aumentando a resistência do solo à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial.

Temporalmente, o tratamento SRA apresentou menores CSE que os demais (Figura 28), não alterando significativamente a CSE até os 367 dias após o teste um de chuva (T1). Os tratamentos SEE e SDE tiveram um aumento mais pronunciado da CSE a partir dos 52 dias após o T1 (T3), enquanto que o SEA e SRE após 245 e 321 dias após o T1 de chuva simulada (T6 e T7), respectivamente. Provavelmente, estes aumentos estão relacionados à formação de sulcos, que ocorreu mais cedo nos tratamentos SEE e SDE e, posteriormente nos tratamentos SEA e SRE.

Figura 28 - Relação da concentração de sedimentos na enxurrada dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.3.8 Profundidade total do fluxo (Y)

O menor valor da profundidade total do fluxo (Y) ocorreu no SDE, seguido pelo SEE, SEA, SRE e SRA (Tabela 9), concordando com o que foi encontrado por Bertol (1995). A Y foi 65% menor no SDE em relação à média dos demais tratamentos. Explica-se este resultado, provavelmente, pela menor rugosidade e ausência de cobertura no SDE em relação aos demais, o que possibilitou a rápida formação de sulcos, com enxurrada de alta velocidade, sem haver acúmulo de enxurrada na superfície (BERTOL, 1995). Vale destacar que, o aumento da Y, não necessariamente reflete em aumento de erosão (COGO, 1981; BERTOL, 1995).

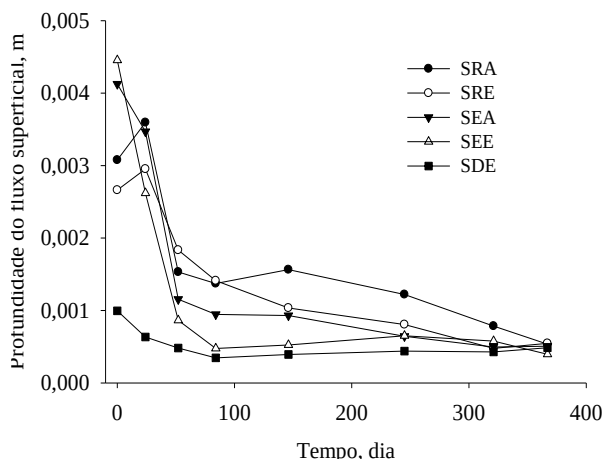
Concordando com o encontrado por Cogo (1981), Bertol (1995), Braidá & Cassol (1999) e Cassol et al. (2004), a maior Y ocorreu no SRA (Tabela 9), devido ao efeito benéfico da massa de resíduos sobre a superfície, resultando em menor velocidade de escoamento. Bertol (1995) afirma que os resíduos diminuem a velocidade do escoamento, fazendo com que haja permanência por mais tempo da enxurrada na área e armazenando na superfície. Os resultados obtidos (Figura 29) são 2 e 3 vezes menores aos obtidos por Cogo (1981) e Bertol (1995), respectivamente e, provavelmente, pela adição do fluxo extra nos referidos trabalhos. Igualmente, os resultados de Y obtidos são superiores aos encontrados por Cassol (2004) e Cassol & Braidá (1999), devido ao fato de trabalharem com microparcelas.

Dentre os tratamentos com resíduos sobre a superfície, a maior Y ocorreu no azevém, 14% maior que o de ervilhaca (Tabela 9), justificando-se pela maior massa de resíduos ao longo do tempo, concordando com Bertol (1995) e Cassol et al. (2004). Bertol (2005) afirma que o resíduo de milho apresentou maior efeito sobre a Y em comparação ao resíduo de trigo devido sua maior massa de resíduos.

A Y foi maior no tratamento SEA que no SRE, discordando do exposto anteriormente. Entretanto, Bertol (1995) encontrou maior Y em tratamento rugoso mais resíduos, devido à diminuição da velocidade da enxurrada pela ação conjunta da cobertura e rugosidade. Neste caso, a rugosidade foi mais eficiente que a massa de resíduos em aumentar a lâmina do fluxo superficial. Entretanto, ao se observar a Figura 29, verifica-se que, embora na média o SRE tenha apresentado menor Y que o SEA, este comportamento não aconteceu ao longo do tempo, pois, a partir dos 52 dias, a Y manteve-se maior no SRE que no SEA, mostrando efeito temporal melhor dos resíduos que a rugosidade. Este comportamento também pode ser verificado ao comparar o SRA e SEA, ou o SRE e o SEE.

Temporalmente, todos os tratamentos diminuíram a Y (Figura 29), embora esta diminuição tenha sido mais pronunciada nos tratamentos cultivados em relação ao SDE, pois a profundidade de fluxo foi sempre baixa neste tratamento, concordando com Bertol (1995) e Cassol et al. (2004). A inexistência de resíduos, aliada a baixa rugosidade superficial e baixa resistência do solo ao sulcamento, condiciona fluxos com baixa profundidade e alta velocidade de escoamento. Ao observar a Figura 29, nota-se que a diminuição da altura de lâmina nos tratamentos cultivados demonstrou uma grande queda a partir dos 52 dias (teste 3) em relação ao teste 1 de chuva simulada, devido a diminuição da cobertura e da rugosidade superficial e, conseqüentemente, diminuição da sua eficiência em retardar o escoamento.

Figura 29 - Profundidade do fluxo total dos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

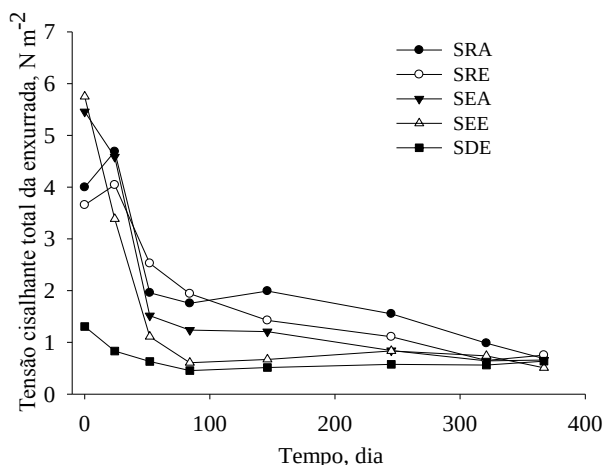
4.3.9 Tensão cisalhante da enxurrada (τ)

Com $2,2 \text{ N m}^{-2}$, a maior tensão cisalhante da enxurrada (τ) ocorreu no SRA, seguida pelo SRE e SEA com $2,0 \text{ N m}^{-2}$, SEE com $1,7 \text{ N m}^{-2}$ e, abaixo destes, o SDE, com $0,7 \text{ N m}^{-2}$. A tensão cisalhante da enxurrada é importante, uma vez que ao superar a tensão crítica de cisalhamento, ocorrerá remoção dos resíduos da superfície do solo (BERTOL, 1995). A tensão cisalhante depende diretamente da taxa de descarga, do aumento do volume e da velocidade da enxurrada (WISCHMEIER, 1973; BERTOL, 1995).

Assim, como a τ está diretamente ligada à profundidade total da enxurrada (BERTOL, 1995), resultou em maior tensão cisalhante no tratamento SRA e, igualmente, a menor no tratamento SDE, com uma diferença de mais de 3 vezes entre estes. Bertol (1995) encontrou aumento da tensão com o aumento da taxa de descarga. Ainda, o autor observou um comportamento semelhante entre os tratamentos para profundidade de fluxo total e tensão crítica de cisalhamento, devido a dependência entre τ e a Y .

Para os tratamentos com resíduos sobre a superfície, o SRA foi o que apresentou maior τ , devido sua maior massa de resíduos ao longo do tempo, que refletiu na Y , concordando com o exposto por Bertol (1995) e Cassol et al. (2004). Bertol (1995) observou maior τ sobre resíduos de milho em comparação ao trigo, justificando tal resultado pela sua maior massa. Este comportamento foi similar ao encontrado na Y , como maior diminuição da tensão cisalhante a partir dos 52 dias após o teste 1 de chuva (teste 3) (Figura 30), devido à perda de eficiência da rugosidade e da cobertura e provável formação de sulcos com escoamento com alta velocidade, alterando a hidráulica do escoamento. Temporalmente, houve um aumento da tensão crítica, conforme houve um aumento da velocidade do escoamento com o passar do tempo, devido a diminuição da cobertura e da rugosidade superficial.

Figura 30 - Tensão cisalhante da enxurrada nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.3.10 Coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning (nr)

O coeficiente de rugosidade de Manning (nr) diferiu entre os tratamentos, com maior nr no SRA, com valor de 0,148 seguido pelo SEA, SRE, SEE e SDE, com valores respectivas de 0,115, 0,105, 0,097 e 0,012 (Tabela 9).

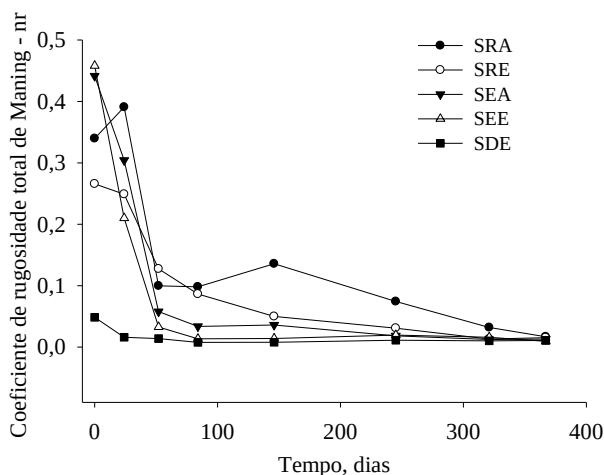
Entre o SRA e o SDE, a diferença foi de aproximadamente 12 vezes. A diferença entre os tratamentos foi mais pronunciada até os 52 dias (Figura 31) Segundo Cassol et al. (2004), o nr retrata a resistência ao escoamento. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Cogo (1981),

onde, comparando um solo escarificado com uma semeadura direta, encontrou maiores valores de nr sob semeadura direta, embora os maiores valores tenham sido obtidos nos tratamentos com alta rugosidade e cobertura do solo.

Comparando os resíduos, o tratamento com azevém apresentou maior nr que a ervilhaca, devido a sua maior eficiência e maior massa e menor decomposição dos resíduos temporalmente (GILMOUR et al., 1998), concordando com Bertol (1995) e Cassol et al. (2004). Bertol (1995) encontrou maior nr sobre resíduo de milho do que sobre resíduo de trigo. Cassol et al. (2004) encontrou nr crescente com o aumento da massa de resíduos.

O comportamento temporal do nr entre os tratamentos foi similar ao comportamento da Y (Figura 31). O nr relaciona-se diretamente à $Y^{2/3}$ e, inversamente, à VE. Assim, mesmo possuindo o maior Y, como a menor VE encontrada foi no SRA, o maior nr ocorreu neste tratamento. Inversamente, o SDE apresentou a maior VE e a menor Y, o que fez com que este tratamento apresentasse o menor nr, concordando com Cassol et al. (2004) e Bertol (2005), onde a cobertura do solo aumentou o nr em comparação ao solo descoberto.

Figura 31 - Coeficiente de rugosidade de Manning nos tratamentos estudados, em um Cambissolo Húmico.



SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado. Valores no tempo zero (teste 1 de chuva - T1) e aos 24 (T2), 52 (T3), 84 (T4), 146 (T5), 245 (T6), 321 (T7) e 367 (T8) dias após o T1.

Fonte: Próprio autor.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS DE SUPERFÍCIE E DE SUBSUPERFÍCIE DO SOLO E AS PERDAS DE SOLO E ÁGUA E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

4.4.1 Correlação entre os atributos de superfície e subsuperfície do solo e as perdas de solo, perdas de água e velocidade da enxurrada

Para os tratamentos com resíduos culturais na superfície do solo (alta cobertura do solo - CS), os coeficiente de correlação que apresentaram significância (5% de probabilidade) com as

perdas de solo foram o carbono orgânico total (COT), diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG), volume de macroporos (MAP) e cobertura do solo por resíduos culturais (CS), com coeficientes respectivos de -0,42, -0,36, -0,40 e -0,70 (Tabela 11). A relação inversa demonstra que, o aumento destas propriedades, infere em perdas menores de solo. O objetivo da correlação foi identificar quais as variáveis analisadas que apresentam uma relação estreita com as PS.

Tabela 11 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de solo para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

	Variáveis										
	PS	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE
PS											
UG01	-0,08										
UG12	0,12	0,75									
COT	-0,42*	0,20	-0,01								
DMG	-0,36*	0,11	-0,11	0,07							
DS	0,23	0,03	0,23	-0,39	-0,39						
MIP	0,14	0,20	0,27	-0,23	0,07	0,36					
MAP	-0,40*	0,01	-0,17	0,42	0,27	-0,68	-0,74				
TCI	-0,22	0,05	0,07	0,14	0,05	-0,04	-0,10	0,17			
CS	-0,71*	0,22	-0,09	0,35	0,38	-0,17	0,33	0,11	0,29		
MRE	-0,24	0,28	-0,11	0,32	0,41	-0,57	0,15	0,21	0,17	0,53	

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; PS: perdas de solo; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

*Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Para os tratamentos com alta rugosidade superficial (RR), o COT, DMG densidade do solo (DS), MAP, RR e massa

de raízes estimada (MRE) correlacionaram-se com significância (5% de probabilidade) com as PS (Tabela 12). Os coeficientes significantes entre as PS e o COT, DMG, DS, MAP, RR e MRE, foram respectivamente -0,64, -0,41, -0,41, -0,38, -0,51 e -0,38. A correlação positiva da DS, demonstra que o adensamento do solo afeta positivamente as PS, pois, há uma diminuição da MAP, o que condiciona maiores volumes de enxurrada e, conseqüentemente, maior capacidade de desagregar e transportar partículas de solo. Estes resultados discordam dos encontrados por Streck (1999), pois afirma que a consolidação da superfície do solo aumenta sua resistência a desagregação.

Tabela 12- Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de solo para os tratamentos com rugosidade do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.

	Variáveis										
	PS	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
PS											
UG01	-0,21										
UG12	0,01	0,67									
COT	-0,64*	0,23	-0,02								
DMG	-0,41*	-0,14	-0,34	0,41							
DS	0,41*	-0,26	0,04	-0,38	-0,43						
MIP	0,08	0,22	0,23	-0,06	-0,29	0,05					
MAP	-0,38*	0,04	-0,16	0,29	0,45	-0,66	-0,60				
TCI	-0,08	0,34	0,16	0,19	-0,07	0,17	0,16	-0,14			
RR	-0,51*	0,28	-0,09	0,56	0,49	-0,54	-0,06	0,44	0,11		
MRE	-0,38*	0,25	-0,09	0,58	0,51	-0,64	-0,02	0,46	-0,03	0,72	

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; PS: perdas de solo; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada. *Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: Próprio autor.

Para os tratamentos com alta cobertura do solo, as perdas de água (PA) apresentaram correlação significativa somente com a taxa constante de infiltração de água no solo (TCI) e com a cobertura do solo (CS), onde os coeficientes de correlação foram de -0,82 e -0,48, respectivamente para TCI e CS (Tabela 13). O efeito da CS sobre as perdas de água concorda com os dados obtidos por Ramos et al. (2014). Já o efeito da TCI está de acordo com o que foi afirmado por Mello et al. (2003), Bertol et al. (2006) e Bertol et al. (2015), em que o aumento da infiltração de água no solo faz diminuir o escoamento superficial.

Tabela 13 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de água para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

	Variáveis										
	PA	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE
PA	1,00										
UG01	-0,03	1,00									
UG12	-0,06	0,75	1,00								
COT	-0,21	0,20	-0,01	1,00							
DMG	-0,10	0,11	-0,11	0,07	1,00						
DS	0,03	0,03	0,23	-0,39	-0,39	1,00					
MIP	0,09	0,20	0,27	-0,23	0,07	0,36	1,00				
MAP	-0,27	0,01	-0,17	0,42	0,27	-0,68	-0,74	1,00			
TCI	-0,82*	0,05	0,07	0,14	0,05	-0,04	-0,10	0,17	1,00		
CS	-0,48*	0,22	-0,09	0,35	0,38	-0,17	0,33	0,11	0,29	1,00	
MRE	-0,06	0,28	-0,11	0,32	0,41	-0,57	0,15	0,21	0,17	0,53	1,00

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; PA: perdas de água; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

*Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: próprio autor.

Para os tratamentos com alta rugosidade superficial (RR), o teor de água na camada de 0-0,1 m (UG01) e a TCI correlacionaram-se com as PA de forma significativa a 5% de probabilidade, onde os respectivos coeficientes de correlação foram -0,28 e -0,48 (Tabela 14). A relação da umidade com as PA estão de acordo com o afirmado por MARIOTI (2012), pois o maior teor de água no solo interfere no tempo de início de escoamento e, conseqüentemente, no volume total da enxurrada.

Tabela 14 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com as perdas de água para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.

Variáveis											
	PA	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
PA	1,00										
UG01	-0,25	1,00									
UG12	-0,28*	0,67	1,00								
COT	-0,22	0,23	-0,02	1,00							
DMG	0,06	-0,14	-0,34	0,41	1,00						
DS	-0,03	-0,26	0,04	-0,38	-0,43	1,00					
MIP	0,08	0,22	0,23	-0,06	-0,29	0,05	1,00				
MAP	-0,09	0,04	-0,16	0,29	0,45	-0,66	-0,60	1,00			
TCI	-0,48*	0,34	0,16	0,19	-0,07	0,17	0,16	-0,14	1,00		
RR	-0,02	0,28	-0,09	0,56	0,49	-0,54	-0,06	0,44	0,11	1,00	
MRE	0,12	0,25	-0,09	0,58	0,51	-0,64	-0,02	0,46	-0,03	0,72	1,00

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; PS: perdas de água; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada. *Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: próprio autor.

Para a velocidade da enxurrada (VE) nos tratamentos com alta cobertura do solo, o COT, a CS e a MRE tiveram

correlação inversa e significativa com as PA (Tabela 15). Os coeficientes de correlação entre as PA com o COT, CS e MRE, foram respectivamente -0,39, -0,93 e -0,50. A correlação do COT e da MRE é coerente, pois ambos interferem na estabilidade dos agregados, o que reflete na resistência do solo à desagregação e resistência ao sulcamento. Igualmente, o DMG correlacionou-se inversamente com a VE, com coeficientes de correlação de -0,30, embora sem significância.

Tabela 15 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com a velocidade da enxurrada para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

	Variáveis										
	VE	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE
VE	1,00										
UG01	-0,12	1,00									
UG12	0,22	0,75	1,00								
COT	-0,39*	0,20	-0,01	1,00							
DMG	-0,30	0,11	-0,11	0,07	1,00						
DS	0,29	0,03	0,23	-0,39	-0,39	1,00					
MIP	-0,21	0,20	0,27	-0,23	0,07	0,36	1,00				
MAP	-0,19	0,01	-0,17	0,42	0,27	-0,68	-0,74	1,00			
TCI	-0,34	0,05	0,07	0,14	0,05	-0,04	-0,10	0,17	1,00		
CS	-0,93*	0,22	-0,09	0,35	0,38	-0,17	0,33	0,11	0,29	1,00	
MRE	-0,50*	0,28	-0,11	0,32	0,41	-0,57	0,15	0,21	0,17	0,53	1,00

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; VE: velocidade da enxurrada; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

*Significativo a 5% de probabilidade de erro ($p > 0,05$).

Fonte: próprio autor.

Para os tratamentos com alta rugosidade superficial (RR), o COT, DMG, DS, MAP, RR e MRE tiveram correlação

significativa e inversa com a VE, onde os coeficientes de correlação foram respectivamente -0,71, -0,52, -0,51, -0,54, -0,72, -0,63 para o COT, DMG, DS, MAP, RR e MRE. Tais resultados demonstram influência do cultivo anterior e da resistência do solo na diminuição da VE. A manutenção de alta RR na diminuição da VE está de acordo com Volk & Cogo (2009), onde demonstram que a rugosidade aumenta a tortuosidade da superfície, aumentando a distância a ser percorrida pela enxurrada, diminuindo, assim, sua velocidade.

Tabela 16 - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo estudados com a velocidade da enxurrada para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.

	Variáveis										
	VE	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
VE	1,00										
UG01	-0,21	1,00									
UG12	0,24	0,67	1,00								
COT	-0,71*	0,23	-0,02	1,00							
DMG	-0,52*	-0,14	-0,34	0,41	1,00						
DS	0,51*	-0,26	0,04	-0,38	-0,43	1,00					
MIP	0,26	0,22	0,23	-0,06	-0,29	0,05	1,00				
MAP	-0,54*	0,04	-0,16	0,29	0,45	-0,66	-0,60	1,00			
TCI	-0,13	0,34	0,16	0,19	-0,07	0,17	0,16	-0,14	1,00		
RR	-0,72*	0,28	-0,09	0,56	0,49	-0,54	-0,06	0,44	0,11	1,00	
MRE	-0,63*	0,25	-0,09	0,58	0,51	-0,64	-0,02	0,46	-0,03	0,72	1,00

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; VE: velocidade da enxurrada; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor.

4.5 ANÁLISE DE TRILHA DAS PERDAS DE SOLO, PERDAS DE ÁGUA E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO COM OS ATRIBUTOS E SUPERFÍCIE E SUBSUPERFÍCIE DO SOLO

4.5.1 Análise de trilha das perdas de solo com os atributos de superfície e subsuperfície do solo

Para as perdas de solo (PS), os coeficientes de trilha das condições de superfície e subsuperfície estudados estão dispostos na Tabela 17 e Tabela 18. O modelo de análise de trilha adotado explicou 72% (R^2) das variações na PS para os tratamentos com alta CS (Tabela 17) e 53% (R^2) das variações na PS para os tratamentos com alta RR (Tabela 18), com efeitos residuais respectivos de 0,53 e 0,69. Dentre as variáveis analisadas para os tratamentos com alta CS, somente a CS teve correlação direta significativa, ficando acima do efeito residual. Próximo disto, ficou a microporosidade, com relação positiva e coeficiente de 0,45 (Tabela 17), porém, quando fica abaixo do efeito residual, elimina a possibilidade de interpretação dos efeitos desses atributos de forma direta (LIMA et al., 2014).

Para os tratamentos com alta RR, devido ao seu efeito residual elevado, nenhuma variável possuiu efeito direto significativo, embora vale destacar o efeito direto de -0,57 do COT nestes tratamentos (Tabela 18). Inversamente à CS, a RR não teve correlação direta com as perdas de solo, mesmo com coeficiente de correlação de -0,51. A correlação e a análise de trilha trabalham somente com relações lineares e, podem, muitas vezes, inferir relações baixas entre variáveis, mesmo que haja uma relação importante entre as mesmas.

Indiretamente, para as perdas de solo nos tratamentos com alta CS, as variáveis que mais influenciaram foram a MIP e principalmente, a CS (Tabela 17). Para as PS, indiretamente, a MIP com relação positiva influenciou a UG01, UG12, DS e CS. Já com relação negativa, a MIP teve efeito indireto sobre as

variáveis COT e MAP (nesta teve o efeito indireto mais pronunciado). Já para as PS, a CS teve efeito indireto sobre as variáveis UG01, COT, DMG, TCI e MRE com relação negativa e, com relação positiva, a DS (maior efeito indireto).

Tabela 17 - Análise de trilha entre a variável básica perda de solo com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

Variável	r	Efeito Indireto via:										
		Efeito Direto	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE
UG01	-0,08	0,23		-0,19	-0,02	-0,02	-0,003	0,09	-0,00	0,01	-0,21	0,04
UG12	0,12	-0,25	0,17		0,001	0,02	-0,02	0,12	0,01	0,01	0,09	-0,01
COT	-0,42	-0,11	0,05	0,003		-0,01	0,004	-0,10	-0,02	0,01	-0,33	0,04
DMG	-0,36	-0,17	0,02	0,03	-0,01		0,04	0,03	-0,01	0,01	-0,35	0,05
DS	0,23	-0,11	0,01	-0,06	0,04	0,07		0,16	0,03	-0,004	0,16	-0,07
MIP	0,14	0,45	0,05	-0,07	0,02	-0,01	-0,04		0,03	-0,01	-0,031	0,02
MAP	-0,40	-0,04	-0,001	0,04	-0,04	-0,05	0,07	-0,33		0,02	-0,10	0,03
TCI	-0,22	0,11	0,01	-0,02	-0,01	-0,01	0,004	0,05	-0,01		-0,27	0,02
CS	-0,71	-0,94	0,05	0,02	-0,04	-0,07	0,02	0,15	-0,005	0,03		0,07
MRE	-0,24	0,13	0,06	0,03	-0,03	-0,07	0,06	0,07	-0,01	0,02	-0,50	
Coeficiente de determinação (R^2): 0,72												
Efeito residual (p_E): 0,53												

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; PS: perdas de solo; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor

Para os tratamentos com alta RR (Tabela 18), as principais variáveis analisadas que tiveram efeito indireto sobre as demais foram o COT, MAP, RR e MRE. O COT teve efeito indireto com relação negativa na UG01, DMG, MAP, TCI, RR e MRE e, com relação positiva sobre a DS. A MAP teve efeito indireto sobre as variáveis COT, DS, RR e MRE com relação negativa, e sobre a DS e MIP com relação positiva. Já a rugosidade superficial teve efeito indireto principalmente sobre

as variáveis COT, DMG, MAP e MRE com relação negativa e, com relação positiva sobre a DS. A MRE teve efeito indireto com relação negativa principalmente sobre a DS e com relação positiva sobre o COT, DMG, MAP e RR.

Tabela 18 - Análise de trilha entre a variável básica perda de solo com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.

Variável	r	Efeito		Efeito Indireto via:								
		Direto	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
UG01	-0,21	-0,10		-0,01	-0,13	0,03	-0,01	-0,03	-0,01	0,02	-0,06	0,09
UG12	0,01	-0,01	-0,07		0,01	0,06	0,001	-0,04	0,04	0,01	0,02	-0,03
COT	-0,64	-0,57	-0,02	0,00		-0,07	-0,01	0,01	-0,08	0,01	-0,12	0,21
DMG	-0,41	-0,18	0,01	0,003	-0,23		-0,01	0,05	-0,12	-0,005	-0,11	0,19
DS	0,41	0,02	0,03	-0,00	0,22	0,08		-0,08	0,18	0,01	0,12	-0,23
MIP	0,08	-0,16	-0,02	-0,00	0,03	0,05	0,001		0,16	0,01	0,01	-0,01
MAP	-0,38	-0,27	-0,00	0,002	-0,16	-0,08	-0,02	0,10		-0,01	-0,10	0,17
TCI	-0,08	0,07	-0,03	-0,002	-0,11	0,01	0,004	-0,0	0,04		-0,02	-0,01
RR	-0,51	-0,22	-0,03	0,001	-0,32	-0,09	-0,01	0,01	-0,12	0,01		0,26
MRE	-0,38	0,37	-0,02	0,001	-0,33	-0,09	-0,02	0,003	-0,12	-0,002	-0,16	
Coeficiente de determinação (R^2):		0,53										
Efeito residual (p_E):		0,69										

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; PS: perdas de solo; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor

4.5.2 Análise de trilha das perdas de água com os atributos de superfície e subsuperfície do solo

Os coeficientes de trilha das condições de superfície e subsuperfície estudados sobre as perdas de água estão dispostos na Tabela 19 e Tabela 20. O modelo de análise de trilha adotado explicou 83% (R^2) das variações na PA para os tratamentos com

alta CS (Tabela 19), e 40% para os tratamentos com alta rugosidade superficial (RR) (Tabela 20), com efeitos residuais respectivos de 0,41 e 0,77.

Dentre as variáveis analisadas para os tratamentos com alta CS, somente a TCI e a CS tiveram correlação direta significativa, pois ficaram acima do efeito residual (Tabela 19). Para os tratamentos com alta rugosidade superficial, devido ao seu efeito residual elevado, nenhuma variável possuiu efeito direto significativo. Entretanto, vale destacar o efeito direto de -0,46 da TCI nestes tratamentos, o que corrobora os resultados nos tratamentos com alta CS. Ainda, ao contrário dos tratamentos com alta CS, a RR não teve correlação direta com as perdas de água, embora distintas rugosidades possam vir a influenciar as perdas.

Tabela 19 – Análise de trilha entre a variável básica perda de água com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

Variável	r	Efeito										
		Direto		Efeito Indireto via:								
		UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE	
UG01	-0,03	0,17		-0,13	0,001	0,001	-0,002	-0,004	-0,002	-0,03	-0,10	0,07
UG12	-0,06	-0,18	0,13	-0,00	-0,001	-0,02	-0,01	0,04	-0,05	0,04	-0,03	
COT	-0,21	0,01	0,03	0,002		0,001	0,03	0,004	-0,11	-0,10	-0,16	0,08
DMG	-0,10	0,01	0,02	0,02	0,00		0,03	-0,001	-0,07	-0,04	-0,17	0,10
DS	0,03	-0,07	0,005	-0,04	-0,002	-0,005		-0,01	0,17	0,03	0,08	-0,14
MIP	0,09	-0,02	0,03	-0,05	-0,001	0,001	-0,02		0,19	0,07	-0,15	0,04
MAP	-0,27	-0,25	0,001	0,03	0,002	0,003	0,05	0,01		-0,12	-0,05	0,05
TCI	-0,82	-0,69	0,01	-0,01	0,001	0,001	0,003	0,002	-0,04		-0,13	0,04
CS	-0,48	-0,45	0,04	0,02	0,002	0,005	0,01	-0,01	-0,03	-0,20		0,13
MRE	-0,06	0,24	0,05	0,02	0,002	0,01	0,04	-0,003	-0,05	-0,12	-0,24	

Coefficiente de determinação (R^2): 0,83

Efeito residual (p_E): 0,41

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; PA: perdas de água; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor

Indiretamente, para os tratamentos com alta CS, as variáveis que mais influenciaram as perdas de água foram a MAP, TCI, CS e MRE, principalmente nas propriedades que tiveram uma alta correlação entre si (Tabela 19). A macroporosidade proporcionou efeito indireto, principalmente no COT (relação negativa), DS e MIP (relação positiva). Já a TCI teve efeito indireto mais pronunciado no COT, MAP, MRE e CS (relação negativa). A CS influenciou indiretamente a UG01, COT, DMG, MIP, TCI e MRE, todos com relação negativa. A MRE influenciou indiretamente principalmente a DS (relação negativa) e o DMG e a CS (relação positiva), devido à alta correlação entre a MRE com estas variáveis.

Para os tratamentos com alta RR, as variáveis que mais influenciaram indiretamente as demais foram, principalmente, o COT a MAP, a TCI e a MRE (Tabela 20). O COT, indiretamente, teve efeito sobre o DMG, RR e MRE com relação negativa, e a DS com relação positiva. Já a MAP teve efeito indireto, principalmente, sobre a DS e MIP com relação positiva, e com o DMG, RR e MRE com relação negativa. A TCI influenciou, indiretamente, a UG01 com maior efeito, e em menor grau a UG12, COT, DS e o MIP com relação negativa, e o MAP com relação positiva. A MRE teve maior efeito indireto dentre todas as variáveis, influenciando com relação positiva o COT, DMG, MAP e RR, e a DS com relação negativa.

Tabela 20 - Análise de trilha entre a variável básica perda de água com as variáveis explicativas estudadas, para os tratamentos com alta rugosidade superficial do solo, em um Cambissolo Húmico.

Variável	r	Efeito		Efeito Indireto via:								
		Direto	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
UG01	-0,25	0,10		-0,20	-0,06	-0,004	-0,02	0,02	-0,01	-0,16	0,002	0,08
UG12	-0,28	-0,29	0,06		0,01	-0,01	0,003	0,02	0,03	-0,07	-0,00	-0,03
COT	-0,22	-0,28	0,02	0,01		0,01	-0,03	-0,005	-0,05	-0,09	0,003	0,20
DMG	0,06	0,03	-0,01	0,10	-0,11		-0,03	-0,02	-0,09	0,03	0,003	0,17
DS	-0,03	0,08	-0,03	-0,01	0,11	-0,01		0,004	0,13	-0,08	-0,003	-0,22
MIP	0,08	0,08	0,02	-0,07	0,02	-0,01	0,004		0,11	-0,07	-0,00	-0,01
MAP	-0,09	-0,19	0,004	0,05	-0,08	0,01	-0,05	-0,05		0,07	0,002	0,15
TCI	-0,48	-0,46	0,03	-0,05	-0,05	-0,001	0,01	0,01	0,03		0,001	-0,01
RR	-0,02	0,01	0,03	0,03	-0,16	0,01	-0,04	-0,01	-0,08	-0,05		0,24
MRE	0,09	0,34	0,02	0,03	-0,16	0,01	-0,05	-0,002	-0,09	0,02	0,004	
Coeficiente de determinação (R^2): 0,40												
Efeito residual (p_E): 0,77												

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; PA: perdas de água; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor

4.5.3 Análise de trilha da velocidade da enxurrada com os atributos de superfície e subsuperfície do solo

Para a velocidade de escoamento (VE), os coeficientes de trilha das condições de superfície e subsuperfície estudados estão dispostos nas Tabela 21 e 22. O modelo de análise de trilha adotado explicou 92% (R^2) das variações na VE para os tratamentos com alta cobertura do solo (CS) (Tabela 21), e 78% (R^2) das variações na VE para os tratamentos com alta rugosidade superficial (RR) (Tabela 22), com efeitos residuais respectivos de 0,28 e 0,47.

Para os tratamentos com alta CS, somente a CS e a DS tiveram correlação direta significativa com a VE, com coeficientes respectivos de -0,91 e 0,28 (Tabela 21). Ainda, próximo disto, ficou

a UG12, com relação positiva e coeficiente de 0,26. Nos tratamentos com alta CS, as variáveis que mais tiveram efeito indireto sobre as demais na VE foram a DS, CS e MRE. O efeito indireto da DS ocorreu no COT, DMG, MAP e MRE com relação negativa, e no MIP com relação positiva. Já a CS teve efeito indireto maior sobre a UG01, COT, DMG, MIP, TCI e MRE com relação negativa, e com a DS com relação positiva. Já a massa de raízes estimada teve efeito principalmente na DS com relação negativa e no DMG e CS com relação positiva.

Tabela 21 - Análise de trilha entre a variável básica velocidade de escoamento com as variáveis explicativas estudadas para os tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE), em um Cambissolo Húmico.

Variável	r	Efeito Indireto via:										
		Efeito Direto	UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	CS	MRE
UG01	-0,12	-0,16		0,19	-0,001	0,01	0,01	-0,011	0,00	-0,01	-0,20	0,05
UG12	0,22	0,26	-0,12		0,00	-0,01	0,06	-0,01	-0,01	-0,01	0,08	-0,02
COT	-0,39	-0,01	-0,03	-0,003		0,01	-0,11	0,01	0,02	-0,02	-0,32	0,06
DMG	-0,30	0,12	-0,02	-0,03	-0,00		-0,11	-0,003	0,02	-0,01	-0,34	0,08
DS	0,29	0,28	-0,005	0,06	0,002	-0,05		-0,02	-0,04	0,01	0,16	-0,11
MIP	-0,21	-0,05	-0,03	0,07	0,001	0,01	0,10		-0,04	0,01	-0,30	0,03
MAP	-0,19	0,06	-0,001	-0,04	-0,002	0,03	-0,19	0,04		-0,02	-0,10	0,04
TCI	-0,34	-0,12	-0,01	0,02	-0,001	0,01	-0,01	0,01	0,01		-0,27	0,03
CS	-0,93	-0,91	-0,04	-0,02	-0,002	0,05	-0,05	-0,02	0,01	-0,04		0,10
MRE	-0,50	0,19	-0,05	-0,03	-0,002	0,05	-0,16	-0,01	0,01	-0,02	-0,50	
Coefficiente de determinação (R²):		0,92										
Efeito residual (p_E):		0,28										

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; VE: velocidade da enxurrada; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; CS: cobertura do solo; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor.

Para os tratamentos com alta RR, devido ao seu efeito residual elevado, não houve efeito direto significativo, embora se possa destacar o efeito direto de -0,41 do COT e de -0,31 do RR com

a VE (Tabela 22). As variáveis UG01, COT, MAP e RR tiveram os maiores efeitos indiretos sobre as demais variáveis na correlação com a VE. A UG01 teve efeito indireto principalmente na UG12, MAP, TCI (relação negativa), e com relação positiva no COT e RR. O COT teve efeito indireto com relação negativa no DMG, RR e MRE, e com relação positiva na DS. A MAP teve seu efeito indireto no DMG e MRE com relação negativa e na DS e MIP com relação positiva. Já o RR teve efeito indireto principalmente no COT, DMG e MRE com relação negativa, e na DS com relação positiva.

Tabela 22 - Análise de trilha entre a variável básica velocidade de escoamento com as variáveis explicativas estudadas para os tratamentos com alta rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE), em um Cambissolo Húmico.

Variável	R	Efeito Direto	Efeito Indireto via:									
			UG01	UG12	COT	DMG	DS	MIP	MAP	TCI	RR	MRE
UG01	-0,21	-0,27		0,22	-0,09	0,01	0,01	0,02	-0,01	-0,01	-0,09	0,004
UG12	0,24	0,33	-0,18		0,01	0,02	-0,001	0,02	0,03	-0,003	0,03	-0,001
COT	-0,71	-0,41	-0,06	-0,01		-0,02	0,01	-0,005	-0,05	-0,004	-0,17	0,01
DMG	-0,52	-0,05	0,04	-0,11	-0,17		0,01	-0,02	-0,08	0,001	-0,15	0,01
DS	0,51	0,07	0,07	0,01	0,16	0,02		0,004	0,12	-0,003	0,17	-0,01
MIP	0,26	0,09	-0,06	0,08	0,02	0,01	-0,001		0,11	-0,003	0,02	-0,00
MAP	-0,13	-0,02	-0,09	0,05	-0,08	0,003	-0,004	0,01		0,03	-0,03	-0,001
TCI	-0,13	-0,02	-0,09	0,05	-0,08	0,003	-0,004	0,01	0,03		-0,03	-0,00
RR	-0,72	-0,31	-0,08	-0,03	-0,23	-0,02	0,01	-0,01	-0,01	-0,00		0,01
MRE	-0,63	0,02	-0,07	-0,03	-0,24	-0,02	0,01	-0,002	-0,08	0,00	-0,22	
Coeficiente de determinação (R^2):			0,78									
Efeito residual (p_e):			0,47									

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado; VE: velocidade da enxurrada; UG01 e UG12: teor de água no solo nas camadas 0-0,1 m e 0,1-0,2 m; COT: Carbono orgânico total; DMG: diâmetro médio geométrico; DS: densidade do solo, PT: porosidade total do solo; MAP: volume de macroporos; MIP: volume de microporos; RR: rugosidade superficial; MRE: massa de raízes estimada.

Fonte: próprio autor.

4.6 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO COM VISTA A REDUÇÃO DAS PERDAS DE SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA

4.6.1 Interpretação dos resultados

De forma geral, o efeito residual da análise de trilha foi alto, principalmente, nos tratamentos com alta rugosidade superficial (RR) (Tabelas 18, 20 e 22). Isto diminuiu a possibilidade de efeito significativo direto, pois, quando o efeito direto fica abaixo do residual, elimina a possibilidade de interpretação dos efeitos desses atributos de forma direta (PACHECO, 2010; LIMA et al., 2014). Para as perdas de solo (PS) que dependem da função específica de resistência do solo à erosão, a análise de trilha mostrou a importância da cobertura do solo (CS) como indicador de qualidade do solo, enquanto, a RR não apresentou o mesmo efeito. Este comportamento, explica-se pela igualdade de rugosidade entre os tratamentos SEA e SEE com distintas PS e pelo aumento da rugosidade no tratamento SDE nos últimos testes quando as PS aumentaram.

A RR, no entanto, teve efeito indireto nos atributos do solo. Apresentou relação negativa com o carbono orgânico total (COT), diâmetro médio geométrico (DMG), volume de macroporos (MAP) e massa de raízes estimada (MRE) e positiva com a densidade do solo (DS), o que demonstrou a sua importância. Conforme se pode observar na figura 20, as PS relacionam-se de forma exponencial com a RR, já que uma variação de 2 mm no índice RR refletiu em variações de PS acima de 10 Mg ha⁻¹.

As PS foram fortemente e diretamente influenciadas pelo COT nos tratamentos com alta RR (Tabela 18), além de sofrer também o efeito indireto do COT, DMG e MRE. Isto demonstra que em um solo sem cobertura e com alta rugosidade, o uso anterior do solo, é essencial para a qualidade do solo. Neste caso, é mais importante do que em um solo com alta cobertura onde a massa de

resíduos e o tipo de cultivo são mais importantes do que a estabilidade de agregados e presença de raízes. Os resíduos culturais na superfície do solo dissipam a energia das gotas de chuva e evitam a desagregação. Assim, a eficiência do resíduo é mais importante que a resistência do solo. A importância do uso anterior na resistência à erosão em um solo descoberto e com alta rugosidade é visualizada nas perdas totais de solo (Tabelas 9 e Apêndice E), pois o tratamento SEA, com maiores COT, DMG e MRE, apresentou a menor PS em comparação ao SEE e SDE, independentemente da RR.

As PA apresentaram relação mais forte com a taxa constante de infiltração de água no solo (TCI) e com a CS do que com as demais variáveis (Tabela 19). Direta e indiretamente, a TCI e a CS constituem-se em função específica quanto à facilitação de entrada de água no solo. A igualdade de PA entre os tratamentos com alta RR entre si, pode ter determinado a falta de correlação entre estas variáveis. Igualmente, a MAP não se relacionou diretamente de forma significativa com as PA, pois o seu efeito ficou abaixo do residual.

Pode-se destacar, entretanto, que, além do efeito direto da macroporosidade que resultou em coeficientes de -0,25 e -0,19, com as PA, para os tratamentos com alta CS e RR, respectivamente, indiretamente a macroporosidade influenciou as demais variáveis (Tabelas 19 e 20). Assim, mesmo que com menor importância que a TCI, a MAP pode ser considerada como indicador para a função de facilitar a entrada de água no solo. Além disso, a pequena diferença variação da MAP e da TCI não possibilitou identificar a sua real importância sobre as PA.

Para a redução da velocidade de escoamento (VE), destacou-se a importância da CS, tanto diretamente como indiretamente (Apêndice E). Isto mostrou que na presença de alta CS os demais atributos têm menor importância na redução da VE. A diferença se deu principalmente pela massa de resíduos (MR) e pelo tipo de resíduo (TC).

A RR, mesmo não apresentando efeito direto significativo sobre a VE, influenciou indiretamente as demais

variáveis (Tabela 22). Ainda, a igualdade entre os tratamentos SEA e SEE, em termos de rugosidade, e o aumento do RR no tratamento SDE nos últimos testes de chuva (Apêndice C), refletiram na baixa relação entre a RR e VE. Isto ocorreu mesmo com a RR exercendo influência sobre a VE, conforme resultados de Volk & Cogo (2009). Ainda, o COT influenciou indiretamente as demais variáveis, demonstrando que o cultivo anterior do solo influenciou a rugosidade e fez diminuir a VE. Este efeito residual afetou a estabilidade dos agregados e a resistência do solo ao sulcamento e, conseqüentemente, a VE. A VE correlacionou-se moderadamente com a MRE, entretanto, diretamente esse efeito não existiu, devido ao efeito indireto principalmente do COT e do RR. Provavelmente, a alta correlação da VE com a MRE, COT e RR, mascararam o efeito real dessas variáveis como indicadoras de qualidade do solo.

4.6.2 Proposição de valores como indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica

Na tabela 23 consta a proposta de indicadores de qualidade do solo com vistas à redução das perdas de solo por erosão hídrica para um Cambissolo Húmico. Igualmente ao proposto por Cogo et al. (2003), sugere-se que as funções específicas que um solo deve conter para resistir à erosão hídrica sejam: (i) resistir à desagregação do solo por impacto das gotas de chuva; (ii) facilitar a entrada de água no solo; (iii) resistir à desagregação e transporte do solo por cisalhamento do escoamento superficial (iv) facilitar o transporte e o armazenamento internos da água. Os pesos respectivamente para as funções i, ii, iii e iv são de 40, 35, 15 e 10. Diferentemente da proposta de Cogo et al. (2003), onde o peso da função iii é de 10, sugere-se dispor para esta função o peso relativo de 15. Justifica-se esta alteração à capacidade erosiva que o escoamento superficial possui. Este efeito ocorre, mesmo sob um solo coberto por resíduos, concordando com os trabalhos de Lopes et al (1987a), Cassol et al. (2004), Bertol et al. (2010) e Barbosa et al. (2012).

Tabela 23 – Sugestão de indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica, baseados nos resultados obtidos, para um Cambissolo Húmico.

(continua)

Função específica de qualidade do solo	PR	IQ	PR	IQ	PR	IQ	PR
		Nível I		Nível II		Nível III	
i. Resistir à degradação física por ação de impacto das gotas de chuva	40	CS	31	MR	20		
				TC	7		
				DMG	2		
				COT	2		
		RR	9	RR	4		
				COT	3		
				MRE	1		
				DMG	1		
ii. Facilitar a entrada de água na superfície do solo	35	TCI	35			MR	7
						TC	4
				CS	20	MAP	5
						Selo/crosta superficial	2
						UG	2
						MAP	6
				RR	15	RR	5
						Selo/crosta superficial	2
iii. resistir à desagregação e transporte do solo por cisalhamento do escoamento superficial	15	CS	8	MR	6		
				TC	2		
		RR	7	RR	4,5		
				COT	1,5		
				MRE	1		

Tabela 23 - Indicadores de qualidade do solo com vistas à redução da erosão hídrica, baseados nos resultados obtidos, para um Cambissolo Húmico. (conclusão)

Função específica de qualidade do solo	PR	IQ	PR	IQ	PR	IQ	PR
	Nível I		Nível II		Nível III		
iv. Facilitar o transporte e o armazenamento interno da água	10	Ko	6,5	Textura	2,5		
				UG	1		
				PROF	0,5		
				DS	0,5		
				MAP	2,5		
		PT	3,5	DS	1		
				UG	0,5		
				PROF	0,5		
				MIP	1,5		

PR: peso relativo; IQ: indicador de qualidade do solo; CS: cobertura do solo; RR: rugosidade superficial; MR: massa de resíduos; TC: tipo de cultivo; MRE: massa de raízes estimada; DMG: diâmetro médio geométrico; COT: carbono orgânico total; TCI: taxa constante de infiltração; UG: umidade gravimétrica; MAP: volume de macroporos; Ko: condutividade hidráulica; PROF: profundidade do solo; DS: densidade do solo; MIP: volume de microporos.

Fonte: próprio autor.

4.6.2.1 Função específica de resistir à degradação física por impacto das gotas de chuva

Diferentemente da proposta de Karlen & Stott (1994), na qual, facilitar a entrada de água no solo tem o maior peso, compreende-se que, para as condições do estudo, a resistência do solo a desagregação (função i) é mais importante do que a diminuição do volume de enxurrada (função ii), concordando com Cogo et al. (2003). Tal compreensão é baseada no fato de o

solo deste estudo apresentar baixa infiltração de água, conforme destacado por Schick et al. (2000) e Bertol et al. (2015), resultando em elevadas PA. Embora a capacidade de transporte de partículas do solo esteja relacionada à energia da enxurrada, o solo do presente estudo apresentou baixa suscetibilidade à erosão mesmo na presença de elevadas PA, devido sua constituição mineralógica e elevado conteúdo de matéria orgânica, conforme demonstrado por Schick et al. (2014a), onde encontrou erodibilidade de $0,0175 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para o Cambissolo Húmico.

Na função i (resistência à desagregação do solo por impacto das gotas da chuva) no nível categórico I do indicador, sugere-se dividir este indicador em outros dois, cobertura do solo por resíduos culturais e rugosidade superficial. A análise de trilha mostrou que estas condições de superfície, isoladamente, influenciaram mais as PS direta e indiretamente, do que os atributos físicos e químicos em si. Assim, como indicador do primeiro nível, sugere-se a inserção da CS e RR, inserindo no nível II as condições de subsuperfície que influenciaram direta e indiretamente, e que, conseqüentemente, exerceram influência sobre as PS.

Obteve-se o peso relativo da CS e RR dividindo-se a perda média de solo dos tratamentos com alta rugosidade superficial (SEA, SEE e SDE) pela perda média dos tratamentos com alta cobertura do solo (SRA e SRE). Assim, Se obteve quantas vezes era a diferença entre estas condições. Esta mesma proporção de diferença foi atribuída ao peso total da referida função (40). A correlação das PS com os atributos físicos e químicos é uma das formas de determinar o peso relativo de cada condição de superfície. Assim, relacionando-se as PS com os atributos, foi possível identificar quais deles influenciaram as PS e, conseqüentemente, a resistência do solo à erosão hídrica, direta ou indiretamente.

Para a função i, no nível categórico II, sugere-se dividir o indicador CS em massa do resíduo (MR), tipo de cultivo (TC),

teor de carbono orgânico total (COT) e estabilidade de agregados em água (DMG). Conforme recém-discutido, a MR apresentou a maior influência sobre as PS, tanto direta quanto indiretamente, nos tratamentos com alta CS. Sob esta condição, os atributos físicos e químicos do solo correlacionaram-se fracamente e, por isso, influenciaram pouco as PS. Assim, a inserção do COT e do DMG como indicador de resistência do solo à desagregação, justifica-se, pela importância destes atributos sobre as PS quando a massa de resíduos for baixa, após sua decomposição. Além da massa de resíduos culturais, foi incluído o tipo do resíduo, pois, para a mesma massa, os dois resíduos (azevém e ervilhaca) diferiram quanto a capacidade de cobrir o solo, concordando com o encontrado por Lopes et al (1987), Braidá & Cassol (1999), Cassol et al. (2004) e Ramos et al. (2014).

Para a RR, na função i, o COT, DMG e MRE apresentaram grande efeito indireto sobre as PS e, consequentemente, sobre a resistência do solo à desagregação, conforme mostrou a análise de trilha. Isto tem lógica, uma vez que o solo, estando descoberto, está exposto à ação das gotas de chuva (exceto nas depressões onde a água fica temporariamente armazenada). Nesta condição, a resistência do solo depende da sua resistência à desagregação. Tais resultados estão de acordo com o observado por Dechen et al. (1981), Streck (1999), Bertol et al. (2006), Volk (2006), De Baets & Poesen (2010) e Brandão & Silva (2012). Estes autores observaram que as raízes das plantas, o COT e a estabilidade de agregados influenciaram a resistência do solo ao impacto das gotas de chuva e ao escoamento superficial. Assim, no nível II para a RR na função i, foram inseridos, como indicadores, além do índice RR, o COT, DMG e MRE.

4.6.2.2 Função específica de facilitar a entrada de água no solo

Para a função ii (facilitar a entrada de água no solo) sugere-se, no nível I, manter o peso total para a infiltração de água no solo (TCI), pois é ela que minimiza a enxurrada, conforme Karlen & Stott (1994). As perdas de água (PA) foram altamente correlacionadas à infiltração de água no solo, em cuja correlação negativa os coeficientes foram de 0,69 e 0,46 para os tratamentos com alta CS e RR, respectivamente (Tabelas 19 e 20).

Para a função ii, sugere-se, no nível II, inserir a CS e a RR como indicadores, pois, influenciam diferentemente e conjuntamente a infiltração de água no solo. As demais variáveis que apresentaram efeito sob estas condições, o fizeram de modo distinto nas diferentes condições.

No nível III, sugere-se, para o indicador CS, dividi-lo pelos indicadores massa de resíduo (MR), tipo de cultivo (TC), MAP, selo/crosta e teor de água no solo (UG). Após a TCI, a CS foi a que melhor se correlacionou, de maneira direta, com as PA, por isso, o maior peso foi dado para este indicador. A inclusão do TC justifica-se pela diferença de PA e de TCI verificada nos dois cultivos. Para uma mesma MR, os resíduos culturais diferiram quanto a capacidade de cobrir o solo, armazenar água na superfície, facilitar a sua entrada no solo e reduzir o volume de enxurrada, concordando com Lopes et al. (1987b).

Dentre as propriedades do solo, a MAP apresentou o maior efeito direto e indireto sobre as PA nos tratamentos com alta CS. Assim, para a função ii, sugere-se utilizar a MAP como indicador no nível III. Igualmente, a presença de crosta superficial influencia a MAP e, consequentemente, a TCI. Conforme verificado por Dalla Rosa et al. (2013b), mesmo sob cobertura do solo, forma-se crosta na superfície. Ainda, o teor de água no solo antecedente à chuva (UG) exerceu efeito direto e indireto sobre as PA, pois influenciou o tempo de início da

enxurrada, a taxa instantânea de infiltração de água e o volume de escoamento total.

Para o indicador RR (nível II), sugere-se inserir a MAP no nível III, além do índice RR, a presença de crosta e o UG. O peso da MAP, direta e indiretamente, foi similar para ambas condições de superfície, logo, o seu peso relativo foi similar para ambas as condições. O índice RR apresentou peso maior, uma vez que, além de influenciar o armazenamento de água, indiretamente influenciou a macroporosidade. Conforme visualizado na figura 21, as PA aumentaram com o passar do tempo nos tratamentos com alta RR, tendo, provavelmente, relação com a diminuição da RR, mesmo não tendo sido esta relação captada na correlação.

4.6.2.3 Função específica de resistir à degradação e transporte por escoamento superficial

Concordando com o exposto por Cogo et al. (2003), julga-se importante manter a função iii (resistir à desagregação e transporte do solo por escoamento superficial), uma vez que o escoamento também ocasiona desagregação e transporte de partículas do solo. Assim, essa ação pode acontecer mesmo sob um solo completamente coberto por resíduos culturais, os quais dissipam a totalidade de energia das gotas, mas não totalmente a energia da enxurrada que é a principal causadora de erosão em sulcos.

Para a função iii, sugere-se, como indicadores no nível I, dividi-lo em CS e RR, para melhor compreender a função de cada um, como proposto por Cogo et al. (2003). No entanto, diferentemente deste autor, propõe-se dar um peso maior para a CS do que para a RR, uma vez que os resíduos foram mais eficientes do que a rugosidade em reduzir a velocidade da enxurrada (Apêndice E). Este comportamento também foi verificado por Lopes et al. (1987a) e Leite et al. (2004).

No nível II do indicador CS, sugere-se dar um peso maior para a MR do que para o TC, pois a diferença de eficiência dos cultivos dependeu mais da MR e de sua resistência à decomposição do que da eficiência do resíduo em si. A eficiência de cada cultivo foi distinta, temporalmente, devido à diferença de massa entre os dois resíduos.

Para o indicador RR do nível I, com base na análise de trilha sugere-se conferir maior peso para o índice RR, como indicador do nível II, pois este apresentou maior influência direta e indireta. Com menor peso, sugere-se inserir o teor de COT e a MRE que influenciam a resistência do solo à desagregação, mas, diminuem temporalmente, favorecendo a redução da RR e aumento do sulcamento do solo. A inserção do COT e da MRE está de acordo com os resultados, pois, essas variáveis apresentaram efeito direto e indireto, pela análise de trilha, na VE. Conforme se visualiza na figura 23, para uma mesma RR a VE diferiu entre os tratamentos e cultivos, concordando com Volk & Cogo (2009).

4.6.2.4 Função específica de facilitar o transporte e o armazenamento interno de água

Na função específica de facilitar o transporte e o armazenamento interno de água (função iv), embora os resultados pouco tenham contribuído para pontuar essa função, sugere-se atribuir indicadores considerando um mesmo solo, e não classes distintas de solo, conforme a sugestão de Cogo et al. (2003). No nível I, diferentemente do proposto por Cogo et al. (2003), sugere-se dividi-lo em dois grupos, um que contemple propriedades que possam ser consideradas importantes para a função do solo de facilitar o transporte interno de água e, outro, para o armazenamento interno da mesma.

Para o transporte interno de água, sugere-se, como indicador do nível I, manter a condutividade hidráulica saturada (K_θ) como sugerido por Cogo et al. (2003). Este indicador

responde pela totalidade do fenômeno, uma vez que, por meio dele, quantifica-se a velocidade com que a água se movimenta internamente no solo. Já para o nível II, sugere-se, como indicador, incluir a textura, o teor de água no solo (UG), a profundidade do solo (PROF), a densidade do solo (DS) e a macroporosidade (MAP). Estas características relacionam-se direta e indiretamente com a movimentação interna de água no solo. O Cambissolo húmico é pouco profundo e apresenta variação em sua textura e profundidade, o que, por sua vez, influencia a ($K\theta$).

Igualmente à função de transporte interno de água, para a função do nível I que interfere no armazenamento interno de água (PT), a PROF foi considerada como indicador de qualidade de nível II. Assim, quanto maior a profundidade efetiva do solo, maior o volume de espaço poroso e, conseqüentemente, maior o volume de água armazenado. Conjuntamente, o UG, DS e MIP refletem diretamente a habilidade do solo em armazenar água. Bertol et al. (2001) destacam que a presença de MIP é importante, uma vez que esta é responsável pela retenção de água no solo e conseqüentemente disponibilização para as plantas.

5 CONCLUSÕES

1. As perdas de solo são menores quando o mesmo é coberto por resíduo de azevém do que de ervilhaca, cuja diferença é 91%; no solo coberto por resíduo de ervilhaca, as perdas de solo são iguais às do solo escarificado contendo apenas raízes de azevém e, nestes dois tratamentos, as referidas perdas são menores do que no solo escarificado contendo apenas raízes de ervilhaca, cuja diferença é 54%.
2. O cultivo do azevém aumenta o teor de carbono orgânico total, o diâmetro médio geométrico dos agregados e a macroporosidade e diminui a densidade do solo em comparação ao cultivo de ervilhaca, independente se os resíduos são mantidos na superfície ou se o solo é escarificado mantendo-se apenas as raízes das culturas; o solo sem cultivo e escarificado diminui o teor de carbono orgânico total e o diâmetro médio geométrico dos agregados em relação ao solo cultivado, independente da cultura e do manejo do mesmo.
3. O solo com cultivo, escarificado, onde se mantém somente as raízes das culturas de azevém e ervilhaca, diminui o teor de carbono orgânico total e o diâmetro médio geométrico dos agregados, e aumenta a densidade do solo em comparação ao solo cultivado e coberto com os resíduos destas culturas.
4. A análise de trilha mostra que a cobertura e rugosidade superficial do solo, taxa de infiltração de água, teor de carbono orgânico total e estabilidade de agregados em água apresentam estreita relação com as perdas de solo e água e velocidade de escoamento superficial; essas características do solo podem ser utilizadas como indicadoras de qualidade do solo do ponto de vista de sua resistência à erosão hídrica.
5. A cobertura do solo, a massa de resíduos e a eficácia do resíduo, são os mais importantes indicadores de qualidade para efeito de resistência do solo à erosão hídrica; a

rugosidade superficial, embora possa ser um bom indicador, apresenta peso menor, e as propriedades físicas e químicas internas do solo são indicadoras de qualidade pouco relevantes na presença de cobertura superficial por resíduos culturais; porém, na presença de rugosidade superficial, as referidas propriedades tem maior peso como indicadoras de qualidade do solo, do ponto de vista da resistência à erosão hídrica.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **R. Bras. Ci. Solo**, 25: 717-723, 2001.

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L. P.; KUNTZE, A. G. M.; Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 29: 415-424, 2005.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. **Total porosity and roughness of the interrow zone as influenced by tillage**. [s. l.]: ARS: USDA, 22p. (Cons. Res. Report, 7), 1966.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; HOLT, R. F. Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 31: 550-556, 1967.

ALVES, A.G.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **R. Bras. Ci. Solo**, 23: 753-761, 1999.

ANDRADE, A. P; MAFRA, A.L.; BALDO, G.R.; PICOLLA, C.D.; BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after 12 year. **R. Bras. Ci. Solo**, 34: 219-226, 2010.

ANDRADE, A.P.; MAFRA, A.L.; PICOLLA, C.D.; ALBUQUERQUE, J.A.; BERTOL, I. Atributos químicos de

um Cambissolo Húmico após 12 anos sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas. **Ciência Rural**, 42: 5. 814-821, 2012.

ANGULO, R.J.; ROLOFF, G.; SOUZA, M.L.P. Correlação entre diferentes formas de determinação e representação da estabilidade e resistência dos agregados do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 8: 7-12, 1984.

BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R. V.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Teor de nitrogênio solúvel na água de erosão hídrica em cultura de aveia e ervilhaca em três formas de semeadura. **R. Bras. Ci. Solo**, 33: 439-446, 2009.

BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; LUCIANO, R.V.; PAZ-FERREIRO, J. Proporção e tamanho de sedimentos e teor de carbono orgânico na enxurrada e no solo para dois cultivos e duas formas de semeadura. **R. Bras. Ci. Solo**, 34: 1.701-1.710, 2010.

BARBOSA, F. T.; BERTOL, I. ; WERNER, R. S. ; RAMOS, J. C. ; RAMOS, R. R. . Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em três tipos e doses de resíduos em duas direções de semeadura direta. **R. Bras. Ci. Solo**. 36: 1279-1290, 2012.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **R. Bras. Ci. Solo**, 24: 599-607, 2000.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na

presença de cobertura por resíduo cultural de trigo. **R. Bras. Ci. Solo**, 11: 187-192, 1987.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta. **R. Bras. Ci. Solo**, 13: 373-379, 1989.

BERTOL, I. **Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 185p. 1995. (Tese de Doutorado)

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de Perda de Solo Por Erosão Para Os Principais Solos do Estado de Santa Catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, 24: 3. 657-668, 2000.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, 58: 3. 555-560, 2001.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC). **R. Bras. Ci. Solo**, 26: 465-471, 2002.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JR., W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28: 155-163, 2004a.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J.C.; RITTER, S. R. Erosão hídrica em um nitossolo háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. ii – perdas de

nutrientes e carbono orgânico. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:1.045-1.054, 2004b.

BERTOL, I.; AMARAL, A. J.; VÁZQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P.; BARBOSA, F. T.; BRIGNONI, L. F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 543-553, 2006.

BERTOL, I.; ZOLDAN JUNIOR, W. A.; FABIAN, E. L.; ZAVASCHI, E. PEGORARO, R.; PAZ GONZÁLES, A. Efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de um Nitossolo Háplico. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 747-757, 2008.

BERTOL, I.; VÁZQUEZ, E. V. ; GONZÁLEZ, A. P.; COGO, N. P. ; LUCIANO, R. V.; FABIAN, E. L. . Sedimentos transportados pela enxurrada em eventos de erosão hídrica em um solo Nitossolo Háplico. **R. Bras. Ci. Solo**, 34: 245-252, 2010.

BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F.T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidraulicamente: fabricação e calibração. **R. Bras. Ci. Solo**, 36: 6. 1.905-1.910, 2012.

BERTOL, I.; BARBOSA, Fabrício Tondello; BERTOL, C.; LUCIANO, R. V. Water infiltration in two cultivated soils in southern Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, 39: 573-588, 2015.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 355 p. 1990.

BERTONI, J.; PASTANA, F.I. Relação chuvas-perdas por erosão em diferentes tipos de solos. **Bragantia**, 23: 3-11, 1964.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, p.363-375, 1986.

BRAMORSKI, I.; MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; CRESTANA, S. Relations between soil surface roughness, tortuosity, tillage treatments, rainfall intensity and soil and water losses from a red yellow latosol. **R. Bras. Ci. Solo**, 36: 1.291-1.297, 2012.

BRADY, N.C.; WEIL, R.P. **The nature and properties of soils**. New Jersey. Ed Prentice Hall, 1000p. 2002.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 23: 711-721, 1999.

BRANDÃO, E. D. ; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, 42: 7. 1.193 – 1.199, 2012.

BURWELL, R. E.; ALLMARAS, R. R.; AMEMIYA, M. A. Field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 27: 697-700, 1963.

BURWELL, R. E.; LARSON, W. E. Infiltration as influenced by tillage induced random roughness and pored space. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 33: 449-452, 1969.

CABEDA, M.S.V. Degradação física de solo. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DOS SOLOS E PLANTIO DIRETO NO SUL

DO BRASIL, 1983, Passo Fundo, Rs. **Anais...** Passo Fundo: p.28-33, 1983.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 19: 1. 121-126, 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 14: 99-105, 1990.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras. Ci. Solo**, 22: 527-538, 1998.

CASSOL, E.A.; LIMA, V.S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38: 117-124, 2003.

CASSOL, E.A.; CANTALICE J.R.B.; REICHERT, J.M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo arenoso com resíduos vegetais. **Pesq. Agropec. Bras.**, 39: 685-690, 2004.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 103: 158-164, 2009.

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

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Effect or crop residue, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 47: 1.005-1.008, 1983.

COGO, N.P. LEVIEN, R.; VOLK, L.B.S., Indicadores de qualidade do solo: aspectos relacionados á erosão hídrica pluvial e à mecanização tratorizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 29. 2003, Ribeirão Preto, SP. **Anais...** Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, 1 CD-ROM.

CORREA, I. M. C.; BERTOL, I.; RAMOS, J. C.; TAKIZAWA, M.M. Rugosidade da superfície de um Cambissolo húmico relacionada com o preparo e compactação do solo sob chuva natural. **R. Bras. Ci. Solo**, 36: 567-576, 2012.

CURRENCE, H. D.; LOVELY, W. G. The analysis of soil surface roughness. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 13: 710-714, 1970.

DALLA ROSA, J. **Dinâmica da formação de crostas superficiais em função de práticas de preparo do solo e chuva simulada.** Piracicaba, ESALQ, 145p. 2012. (Tese de Doutorado)

DALLA ROSA, J.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J.C.; ALBUQUERQUE, J.A.; MIQUELLUTI, D.J.; NOHATTO, M.A.; FERREIRA, E.Z.; OLIVEIRA. O.L.P. Soil physical

properties and grape yield influenced by cover crops and management systems. **R. Bras. Ci. Solo**, 37: 1352-1360, 2013a.

DALLA ROSA, J.; COOPER, M.; DARBOUX, F.; MEDEIROS, J.C. Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada. **R. Bras. Ci. Solo**, 37: 400-410, 2013b.

DE BAETS S.; POESEN J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effect of plant roots during concentrated flow. **Geomorphology**, 118: 425–432, 2010.

DECHEN, S. L. F.; LOMBARDI NETO, F.; CASTRO, O.M. Gramíneas e leguminosas e seus restos culturais no controle da erosão em Latossolo. **R. Bras. Ci. Solo**, Piracicaba, 5: 133-137, 1981.

DEXTER, A. R. Effect of rainfall on the surface micro-relief soil. **J. of Terramech**. 14: 1. 11-22. 1977.

DISSMEYER, G.E.; FOSTER, G.R. Estimating the cover management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. **J. Soil Water Conserv.**, 36: 235-240, 1981.

DULEY, F.L. Surface factors effecting the rate of intake of water by soil. **Soil sci. soc. Amer. Proc.** 4: 60-64, 1939.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies. **Agricultural Engineering**, 28: 145-147, 197-201, 245-248, 297-300, 349-351, 402-405, 442-444, 1947.

ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas

de um Latossolo Bruno Álico. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 13: 2. 259-267, 1989.

ELTZ, F. L. F. & NORTON, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61: 1. 746-1.755, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Documentos, 1. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 212p. 1997.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)** – Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 2011.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, 37: 5. 1.316-1322, 2007.

FOSTER, G.R. Conservation practices in erosion models. In: Proceedings of Conservation in the 80's – An International Conference on Soil Conservation. Silsoe, **National College of Agric. Eng.**, p.273-278, 1980.

FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G.; MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Soil Water Conserv.**, 36: 355-359, 1981.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrologic**

modeling of small watersheds. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p.297-380. (Monograph, 5).

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Soil erosion and sedimentation by water – an overview. In: **NATIONAL SYMPOSIUM BY WATER**, 1977, Illinois. Proceedings...St. Joseph: p.1-13, 1977.

FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B., MOLDENHAUER, W.C. Critical slope lengths for unanchored cornstalk and wheat straw residue. **Trans. Of the ASAE**, p.935-947, 1982a.

FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B., MOLDENHAUER, W.C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. **Trans. of the ASAE**, p. 940-947, 1982b.

FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; RÖMKENS, M. J. M.; ONSTAD, C. A. Processes of soil erosion by water. In: FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil erosion and crop productivity. Madison: American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America**, 1985. p. 137-162.

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). WEPP users summary. NSERL n° 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana. 1995.

GEE, G.W.; BAUDER, J. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**, p.383-412, 1986.

GILLEY, J.E.; FINKNER, S.C.; VARVEL, G.E. Size distribution of sediment as affected by surface residue and

slope length. **Trans. Am. Soc. Agron. Eng.** 30: 1.419-1.424, 1987.

GILMOUR, J.T.; MAUROMOUSTAKOS, A.; GALE, P.M.; NORMAN, R.J. Kinetics of crop residue decomposition: variability among crops and years. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 62: 750-755, 1998.

GREGORICH, E. G. Quality In: LAL, R. (ed.) **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker p. 1.058-1.061, 2002.

GUBIANI, P.I; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, 36: 2. 664-668, 2006.

HERRICK, J.E.; WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition and soil biological activity. In: Lal, R., Kimble, J., Follett, J., Steward, B.A. (Eds.), **Advances in Soil Science: Soil Processes and the Carbon Cycle**. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 405–425, 1998.

HUDSON, N. W. **Soil Conservation**. 3. ed. Ithaca: Cornell University Press, 324p. 1995.

INGARAMO, O.E. **Indicadores físicos de la degradación del suelo**. Universidade da Coruña, La Coruña, 298p. 2003. (Tese de Doutorado).

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR.
Recomendações gerais do encontro sobre uso do simulador de chuva em pesquisa de conservação de solo no Brasil. In: 1º Encontro nacional sobre pesquisa de erosão com simuladores

de chuva, 7-11 de junho de 1975, Londrina. **Anais...** Londrina, p.107-120, 1975.

KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUÉRIF, J.; PITKANEN, J.; IVERSEN, N. V.; DOUGLAS J. T.; GONZÁLES, A. P. Predicting depressional storage from soil roughness. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64: 1.749-1.758, 2000.

KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, (SSSA Special Publication, 35)**. p.53-71, 1994.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARCK, F.E., eds. Methods of soil analysis. Part 1, Madison, **American Society of Agronomy**, p.499-510, 1965.

KUHN, N. J.; ARMSTRONG, E. K.; LING, A. C.; CONNOLLY, K. L.; HECKRATH, G. Interrill erosion of carbon and phosphorus from conventionally and organically farmed Devon silt soils. **Catena**, 91: 94–103, 2012.

LAFLEN, J.M.; COLVIN, T.S. Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, 24: 605-609, 1981.

LAFLEN, J.M.; FOSTER, G.R.; ONSTAD; C. Simulation of individual storm soil losses for modeling the impact of soil erosion on cropland productivity. In: EL SWAFY, MULDENHAUER AND LO (Ed.). **Soil erosion and conservation**. Ankeny: SCSA, p.285-295, 1985.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: Evaluation of sustainable land management in the developing world. Vol. 2. IBSRAM Proc. 12 (2). Bangkok, Thailand. **Int. Board for Soil Res. Management**. 1991.

LEITE, D.; BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I - Perdas de solo e água. **R. Bras. Ci. Solo**, 28: 1.033-1.044, 2004.

LIBARDI, P.L.; PREVEDELLO, C.L.; PAULETTO, E.A.; MORAES, S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **R. Bras. Ci. Sol.o**, 10: 85-90, 1986.

LIMA, R.P.; SILVA, A.R.; OLIVEIRA, D.M.S. Análise de trilha de atributos físicos na resistência à penetração de um latossolo amarelo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, 1: 1. 65-74, 2014.

LIÑARES, L. M.; CASTRO, T. M. M. Medida de la rugosidad del suelo en terrenos de cultivo. En: ORTIZ, G. A.; FRANCH, S. F. Eds. **V Reunión Nacional de Geomorfología**. Barcelona, p.731-734, 1998.

LITTEL, R.C.; PENDERGAST, J.; NATARAJAN, R. Modelling covariance structure in the analysis of repeated measures data. **Statistics Med.**, 19: 1. 793-1.819, 2000.

LOPES, P. R. C.; COGO, N. P.; CASSOL, E. A. Influência da cobertura vegetal morta na redução da velocidade de enxurrada

e na distribuição de tamanho de sedimentos transportados. **R. bras. Ci. Solo**, 11: 193-197, 1987a.

LOPES, P.R.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **R. bras. Ci. Solo**, 11: 71-75, 1987b.

LUCIANO, R.V. **Erosão hídrica em três formas de semeadura de aveia e ervilhaca em um Cambissolo Húmico**. Lages, UDESC, 84p. 2008. (Dissertação de Mestrado).

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I. ; BARBOSA, F. T. ; VÁZQUEZ, E. V. ; FABIAN, E. L.. Perdas de água e solo por erosão hídrica em duas direções de semeadura de aveia e ervilhaca. **R. bras. Ci. Solo**, 33: 669-676, 2009.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 27: 84-86, 1962.

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 cultivo**. Lages, UDESC, 74p. 2012. (dissertação de mestrado).

MARIOTI, J.; BERTOL, I.; RAMOS, J.C.; WERNER, R.S.; PADILHA, J.; BANDEIRA, D.H. Erosão hídrica em semeadura direta de milho e soja nas direções da pendente e em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo e descoberto. **R. Bras. Ci. Solo**, 37: 1.361-1.371, 2013.

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

MEYER, L.D. **An investigation of methods for simulating rainfall in standard runoff plots and a study of the drop size, velocity, and cinetic energy of selected spray nozzles.** USDAARS- SWCRD-ESWMB and Purdue University West Lafayette, (Special Report nº 81). 43p. 1958.

MEYER, L.D.; McCUNE, D.L. Rainfall simulator for runoff plots. **Agricultural Engineers**, St. Joseph, 39:644-648. 1958.

MEYER, L. D., FOSTER, G. R., NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. **Trans. of the Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 18, n. 5, p. 905-911, 1975.

MIRANDA, J. G. V. **Análisis fractal del microrrelieve del suelo.** Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 313p. 2000.

NEARING, M.A. Erosion by water, process-based modeling. In: LAL, R., ed. **Encyclopedia of Soil Science**. New York, Marcel Dekker, Inc., p.473-475, 2002.

NORTON, L.D.; COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C. Effectiveness of mulch in controlling soil erosion. In: EL SWAIFY, S.A.; MOLDENHAUER, W.C.; LO, A. (Eds.). **Soil erosion and conservation**. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985. 80p.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; SOBRINHO, T.A.; VITORINO, A.C.T.; SOUZA, C.M.A.; URCHEI, M.A. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de

manejo e influenciada por chuva artificial. **R. Bras. Ci. Solo**, 34: 443-452, 2010.

PACHECO, E.P. **Estudo da compressibilidade e qualidade de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas**. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010. 106p. (Tese de Doutorado)

PAZ-FERREIRO, J.; BERTOL, I.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Quantification of tillage, plant cover, and cumulative rainfall effects on soil surface microrelief by statistical, geostatistical and fractal indices. **Nonlinear Processes in Geophysics** 15: 575-590, 2008.

PORTELA, J. C. **Restauração da estrutura do solo por seqüências culturais e sua relação com a erosão hídrica**. Porto Alegre, RS, UFRGS, 188p. 2009. (Tese de Doutorado).

POTTER, K.N. Soil properties on random roughness decay by rainfall. **Transactions of the ASAE**, 33: 6. 1.889-1.892, 1990.

RAMOS, J.C.; BERTOL, I.; BARBOSA, F.T.; MARIOTI, J.; WERNER, R.S. Influência das condições de superfície e do cultivo do solo na erosão hídrica em um cambissolo húmico. **R. Bras. Ci. Solo**, 38: 1.587-1.600, 2014.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícola. **Ci. Amb.**, 27: 29-48, 2003.

REID, J.B.; GOSS, M.J. Changes in the aggregate stability of a sandy loam effected by growing roots of perennial ryegrass (*Lolium perenne*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 31: 325-328, 1980.

RENARD, K.G.; G.R. FOSTER. **Soil conservation**: Principles of erosion by water. In H.E. Dregne and W.O. Willis, eds., Dryland Agriculture, Agronomy Monogr. 23, **Am. SOC. Agron., Crop Sci. SOC. Am., and Soil Sci. SOC. Am.**, 155-176, 1983.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. **Predicting soil erosion by water**: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agricultura, 384p. 1997. (Agriculture Handbook, 703)

RÖMKENS, M. J. M.; WANG, J. Y. Effect of tillage on soil roughness. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 29: 429-433, 1986.

ROTH, C.; HAAS, U. O efeito das interações físico-químicas do solo na agregação de um Latossolo Roxo . Berlim: Technische Universität Berlin, 20p. 1989. (Relatório Final)

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JUNIOR, A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **R. Bras. Ci. Solo**, 24: 427-436, 2000.

SCHICK, J. **Fatores R e K da USLE e perdas de solo e água em sistemas de manejo sobre um Cambissolo Húmico em Lages, SC**. Lages, UDESC, 149p. 2014. (Tese de Doutorado)

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um cambissolo húmico sob chuva natural. **R. Bras. Ci. Solo**, 38: 1.906-1.917, 2014a.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erosividade das chuvas de lages, santa catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, 38: 1890-1905, 2014b.

SCHWAB, G. O.; FREVERT, R. K.; EDMINSTER, T.W. **Soil and water Conservation engineering**, New York: J Willey, cap. 4: Runoff, 525p. 1981.

SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Sci.**, 164: 224-234, 1999.

SLONEKER, L.L.; MOLDENHAUER, W.C. Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. **Journal of Soil and Water Conservation**, 32: 231-236, 1977.

STRECK, E.V. **Erosão hídrica do solo relacionada com o subfator uso anterior da terra do modelo "RUSLE"**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 195p. 1999. (Tese de Doutorado)

STROO, H.F.; BRISTOW, K.L.; ELIOT, L.F.; PAPENDICK, R.I.; CAMPBELL, G.S. Predicting rates of wheat residue decomposition. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 53: 91-99, 1989.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. Análise de solos, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 174p. 1995.

TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.L. **Physical edaphology – The physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco, W.H. Freeman, 532p. 1972.

TREIN, C.R.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na

rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **R. Bras. Ci. Solo**, 15: 19. 105-111, 1991.

VOLK, L.B.S. **Condições físicas da camada superficial do solo resultantes do seu manejo e indicadores de qualidade para redução da erosão hídrica e do escoamento superficial**. Porto Alegre, UFRGS, 2006. 148p. (Tese de Doutorado)

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 33: 1.459-1.471, 2009.

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

WAGNER, L. E.; YIMING YU. Digitization of profile meter photographs. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.** 34:2. 412-416, 1991.

WISCHMEIER, W.H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 23: 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H. Conservation tillage to control water erosion. In: NATIONAL CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE, Ankeny, 1973. Proceedings...Ankeny: **Soil Conservation Society of America**, 1973.p. 133-141.

WISCHMEYER, W. H. Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas. In: **Present and prospective technology for predicting sediment**

yields and sources, USDA-ARS, ARS-40, U. S. Govt. Printing Office, Washington, DC, p.118-124, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transaction American Geophysical Union**, 39: 285-291, 1958.

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

WOLSCHICK, N. H. **Desempenho de plantas de cobertura e influência nos atributos do solo e na produtividade de culturas em sucessão**. Lages, UDESC, 93 p. 2014. (Dissertação de Mestrado)

WOLFINGER, R.D. Covariance structure selection in general mixed models. **Commun. Statist. Simul. Comput.**, 22: 1.079-1.106, 1993.

ZOLDAN JUNIOR, W.A. **Rugosidade superficial do solo ocasionada por uma operação de escarificação aplicada após cinco anos e meio de uso de sistemas de manejo do solo, e suas relações com a erosividade da chuva e erosão hídrica em um Nitossolo Háplico**. Lages, UDESC, 100p. 2006. (Dissertação de Mestrado)

ZOLDAN JUNIOR, W.A.; BERTOL, I.; PEGORARO, R.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e afetada pela erosividade da chuva. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:353-362, 2008.

APÊNDICES

Apêndice A - Carbono orgânico total, diâmetro médio geométrico, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo na camada de 0-0,025 m nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

		Tratamentos					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Carbono orgânico total					
		g kg ⁻¹					
T1	0	3,09	3,08	2,98	2,67	2,29	2,82
T2	24	2,73	2,85	3,00	2,39	2,00	2,59
T3	52	2,93	2,94	2,84	2,27	2,37	2,67
T4	84	2,78	2,69	2,93	2,43	2,19	2,60
T5	146	2,94	2,51	2,46	2,13	1,83	2,38
T6	245	3,08	2,86	2,63	1,96	2,07	2,52
T7	321	2,84	2,58	2,46	2,03	2,09	2,40
T8	367	2,69	2,61	2,05	1,75	1,84	2,19
Média		2,89	2,77	2,67	2,20	2,08	
		Diâmetro médio geométrico					
		mm					
T1	0	4,88	5,49	5,25	4,61	3,90	4,82
T2	24	4,82	4,60	4,33	4,23	3,71	4,34
T3	52	4,67	3,45	3,41	4,16	3,47	3,83
T4	84	4,87	4,29	4,37	4,50	3,40	4,28
T5	146	4,15	4,55	4,46	3,88	3,02	4,01
T6	245	3,82	4,04	4,23	4,18	3,54	3,96
T7	321	4,38	3,87	4,55	3,51	3,25	4,11
T8	367	4,20	3,17	3,80	4,01	3,85	3,81
Média		4,47	4,18	4,30	4,13	3,52	
		Densidade do solo					
		g cm ⁻³					
T1	0	1,07	1,07	0,89	0,99	1,00	1,00
T2	24	1,16	1,20	1,06	1,13	1,01	1,11

Apêndice A - Carbono orgânico total, diâmetro médio geométrico, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo na camada de 0-0,025 m nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

		Tratamentos					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Densidade do solo					
		----- g cm ⁻³ -----					
T3	52	1,38	1,39	1,28	1,29	1,24	1,32
T4	84	1,42	1,42	1,33	1,30	1,28	1,35
T5	146	1,22	1,33	1,35	1,32	1,32	1,31
T6	245	1,20	1,31	1,27	1,47	1,25	1,30
T7	321	1,21	1,32	1,27	1,25	1,25	1,26
T8	367	1,30	1,35	1,39	1,31	1,22	1,31
Média		1,24	1,30	1,23	1,26	1,20	
		Porosidade total					
		----- m ³ m ⁻³ -----					
T1	0	57	56	64	55	61	58
T2	24	53	50	57	61	60	56
T3	52	53	49	53	49	51	51
T4	84	53	52	51	47	48	50
T5	146	56	52	55	46	54	53
T6	245	52	46	49	42	51	48
T7	321	51	45	48	50	50	49
T8	367	48	50	48	52	52	50
Média		53	50	53	50	53	
		macroporosidade do solo					
		----- m ³ m ⁻³ -----					
T1	0	21	25	29	18	26	24
T2	24	17	13	23	29	27	22
T3	52	14	11	14	14	11	13
T4	84	17	10	15	8	10	12
T5	146	24	18	20	16	12	18
T6	245	24	18	19	13	17	18

Apêndice A - Carbono orgânico total, diâmetro médio geométrico, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo na camada de 0-0,025 m nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(conclusão)

		Tratamentos					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	macroporosidade do solo					
		----- m ³ m ⁻³ -----					
T7	321	20	16	15	22	13	17
T8	367	19	10	6	13	12	12
Média		20	15	18	17	16	
		Microporosidade do solo					
		----- m ³ m ⁻³ -----					
T1	0	36	31	35	37	35	35
T2	24	36	38	34	33	33	35
T3	52	39	38	38	35	40	38
T4	84	35	41	36	39	38	38
T5	146	32	35	35	30	42	35
T6	245	27	28	30	29	34	30
T7	321	31	30	34	28	36	32
T8	367	30	40	42	38	40	39
Média		33	35	35	34	37	

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

Apêndice B - Teores de água gravimétrica no solo antecedente às chuvas nas camas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m (UG01 e UG12) nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	----- m ³ m ⁻³ -----					
		0-0,1 m					
T 1	0	0,32	0,3	0,32	0,2	0,33	0,29
T 2	24	0,25	0,18	0,23	0,2	0,24	0,22
T3	52	0,34	0,34	0,31	0,28	0,32	0,32
T 4	84	0,24	0,27	0,23	0,22	0,21	0,23
T 5	146	0,26	0,23	0,19	0,20	0,23	0,22
T 6	245	0,27	0,24	0,22	0,21	0,23	0,23
T 7	321	0,24	0,28	0,23	0,19	0,26	0,24
T 8	367	0,24	0,24	0,22	0,21	0,28	0,24
Média		0,27	0,26	0,24	0,21	0,26	
0,1-0,2 m							
T 1	0	0,31	0,28	0,35	0,22	0,39	0,31
T 2	24	0,29	0,27	0,27	0,25	0,30	0,28
T3	52	0,33	0,35	0,31	0,27	0,36	0,32
T 4	84	0,29	0,31	0,33	0,3	0,33	0,31
T 5	146	0,3	0,31	0,29	0,28	0,33	0,3
T 6	245	0,31	0,3	0,32	0,32	0,33	0,32
T 7	321	0,31	0,32	0,30	0,27	0,35	0,31
T 8	367	0,31	0,32	0,29	0,25	0,34	0,30
Média		0,31	0,31	0,31	0,27	0,34	

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

Apêndice C - Valores de rugosidade ao acaso da superfície do solo (RR) de cada tratamento antes do preparo do solo (AP), em cada um dos testes de chuva simulada (T) e após o teste oito de chuva (AT8) dos diferentes tratamentos, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), juntamente com a comparação de médias pelo procedimento MIXED, em um Cambissolo Húmico.

Teste de chuva											
Tratamento	AP	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	AT8	Média
Dias após T1		0	24	52	84	146	245	321	367		
Rugosidade superficial											
	mm										
SEA	4,7	20,5	15,5	14,0	12,3	11,1	10,1	9,7	9,0	8,1	12,3
SEE	4,6	17,4	14,7	11,9	12,5	11,4	10,8	10,4	10,2	9,3	12,1
SDE	2,9	14,6	9,6	8,3	8,4	6,6	7,0	11,1	11,1	10,1	9,0
Média	4,1	17,5	13,3	11,4	11,1	9,7	9,3	10,4	10,1	9,2	

SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

Apêndice D - Massa de resíduos e cobertura do solo por resíduos culturais nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

Tratamento	Teste de chuva								Média
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	
Dias após T1	0	24	52	84	146	245	321	367	
Massa de resíduos									
	----- Mg ha ⁻¹ -----								
SRA	4,7	4,6	4,1	3,1	2,9	2,5	2,2	0,9	3,1
SRE	4,4	4,2	2,6	2,4	1,6	1,6	0,7	0,3	2,2
Média	4,6	4,4	3,3	2,8	2,3	2,0	1,4	0,6	
Cobertura do solo									
	----- % -----								
SRA	100	98	97	99	89	57	44	31	77
SRE	90	91	86	87	66	33	17	10	60
Média	95	95	92	93	78	45	31	21	

SRA: solo coberto por resíduo de azevém; SRE: solo coberto por resíduo de ervilhaca.

Fonte: Próprio autor.

Apêndice E - Tempo de início de escoamento, perdas de solo, perdas de água, taxa de infiltração de água no solo, velocidade da enxurrada, índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada, concentração dos sedimentos transportados na enxurrada nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

(continua)							
		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Tempo de início de escoamento					
		----- min -----					
T1	0	16	18	17	22	33	21
T2	24	22	17	24	25	23	22
T3	52	14	4	21	3	13	11
T4	84	24	16	15	8	10	14
T5	146	28	12	10	4	4	11
T6	245	21	11	7	5	4	10
T7	321	17	6	5	6	4	8
T8	367	7	4	3	3	4	4
Média		18	11	13	9	12	
Perdas de solo							
		----- Mg ha ⁻¹ -----					
T1	0	0,05	0,2	0,23	0,39	1,03	0,38
T2	24	0,03	0,22	0,08	0,29	0,45	0,21
T3	52	0,04	0,26	0,31	2,11	2,5	1,05
T4	84	0,03	0,81	0,1	5,69	6,8	2,69
T5	146	0,04	0,4	0,57	8,32	12,01	4,27
T6	245	0,06	0,95	5,31	13,6	19,56	7,9
T7	321	0,61	10,68	10,15	17,49	9,66	9,72
T8	367	2,08	17,7	16,81	23,12	20,27	16,4
Média		2,93	31,21	33,57	71,62	72,27	
Perdas de água							
		----- mm -----					
T1		57	56	73	68	52	61

Apêndice E - Tempo de início de escoamento, perdas de solo, perdas de água, taxa de infiltração de água no solo, velocidade da enxurrada, índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada, concentração dos sedimentos transportados na enxurrada nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Perdas de água					
		----- mm -----					
T2	24	48	55	63	61	49	55
T3	52	54	60	60	67	50	58
T4	84	41	51	49	55	57	50
T5	146	35	54	62	63	66	56
T6	245	48	57	60	63	71	60
T7	321	58	69	72	71	73	69
T8	367	59	73	81	80	83	75
Média		50	59	65	66	63	
		Taxa constante de infiltração de água no solo					
		----- mm h ⁻¹ -----					
T1	0	15	13	10	9	12	12
T2	24	20	13	10	11	9	13
T3	52	15	11	13	11	10	12
T4	84	21	12	14	12	8	13
T5	146	17	10	9	10	9	11
T6	245	15	12	12	9	12	12
T7	321	12	11	10	8	11	10
T8	367	15	10	10	11	9	11
Média		16	12	11	10	10	
		Velocidade da enxurrada					
		----- m s ⁻¹ -----					
T1	0	0,027	0,027	0,029	0,029	0,086	0,039
T2	24	0,026	0,031	0,036	0,056	0,175	0,065
T3	52	0,048	0,047	0,074	0,105	0,162	0,087

Apêndice E - Tempo de início de escoamento, perdas de solo, perdas de água, taxa de infiltração de água no solo, velocidade da enxurrada, índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada, concentração dos sedimentos transportados na enxurrada nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Velocidade da enxurrada					
		----- m s ⁻¹ -----					
T4	84	0,046	0,056	0,103	0,174	0,239	0,123
T5	146	0,041	0,079	0,098	0,168	0,250	0,127
T6	245	0,06	0,108	0,155	0,139	0,190	0,130
T7	321	0,115	0,173	0,187	0,156	0,214	0,169
T8	367	0,143	0,17	0,179	0,228	0,209	0,186
Média		0,063	0,086	0,108	0,132	0,190	
Índice D ₅₀ dos sedimentos da enxurrada							
----- mm -----							
T1	0	0,04	0,12	0,03	0,34	0,77	0,26
T2	24	0,05	0,55	0,03	0,28	0,84	0,35
T3	52	0,07	0,61	0,03	1,44	1,28	0,69
T4	84	0,05	0,71	0,79	1,03	2,49	1,02
T5	146	0,16	0,77	0,18	1,40	2,94	1,09
T6	245	0,10	1,28	1,03	1,71	1,10	1,04
T7	321	0,18	0,97	1,54	1,05	1,49	1,05
T8	367	0,74	1,44	2,35	1,49	1,53	1,51
Média		0,18	0,81	0,75	1,09	1,56	
Concentração dos sedimentos na enxurrada							
----- g l ⁻¹ -----							
T1		0,08	0,33	0,30	0,53	2,30	0,71
T2	24	0,07	0,43	0,16	0,53	1,05	0,45
T3	52	0,07	0,49	0,32	3,39	7,00	2,25
T4	84	0,07	0,40	1,72	12,61	17,40	6,44
T5	146	0,09	0,84	0,99	14,25	20,27	7,29

Apêndice E - Tempo de início de escoamento, perdas de solo, perdas de água, taxa de infiltração de água no solo, velocidade da enxurrada, índice D_{50} dos sedimentos transportados na enxurrada, concentração dos sedimentos transportados na enxurrada nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(conclusão)

		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Dias após T1		Concentração dos sedimentos transportados na enxurrada					
Teste		----- g l ⁻¹ -----					
T6	245	0,13	2,34	10,80	24,16	31,62	13,81
T7	321	0,64	16,13	17,66	27,71	17,07	15,84
T8	367	2,63	20,65	21,35	33,19	25,14	20,59
Média		0,47	5,20	6,66	14,55	15,23	

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.

Apêndice F - Profundidade total do fluxo, tensão cisalhante da enxurrada e coeficiente de rugosidade de Manning (nr) nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

		Tratamento					
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	Média
Teste	Dias após T1	Profundidade total do fluxo					
		----- m -----					
T1	0	0,0031	0,0027	0,0041	0,0045	0,0010	0,0031
T2	24	0,0036	0,0030	0,0035	0,0026	0,0006	0,0027
T3	52	0,0015	0,0018	0,0012	0,0009	0,0005	0,0012
T4	84	0,0014	0,0014	0,0009	0,0005	0,0003	0,0009
T5	146	0,0016	0,0010	0,0009	0,0005	0,0004	0,0009
T6	245	0,0012	0,0008	0,0006	0,0007	0,0004	0,0008
T7	321	0,0008	0,0005	0,0005	0,0006	0,0004	0,0006
T8	367	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005
Média		0,0017	0,0015	0,0015	0,0013	0,0005	
		Tensão cisalhante da enxurrada					
		----- N m ⁻² -----					
T1	0	4,00	3,66	5,46	5,75	1,31	4,03
T2	24	4,69	4,04	4,58	3,39	0,83	3,51
T3	52	1,96	2,53	1,52	1,11	0,63	1,55
T4	84	1,76	1,94	1,24	0,61	0,45	1,20
T5	146	1,99	1,43	1,21	0,67	0,52	1,16
T6	245	1,55	1,11	0,84	0,84	0,58	0,98
T7	321	0,98	0,65	0,64	0,74	0,56	0,72
T8	367	0,69	0,75	0,66	0,51	0,64	0,65
Média		2,20	2,01	2,02	1,70	0,69	
		Coeficiente de rugosidade de Manning					
		----- nr -----					
T1	0	0,340	0,266	0,441	0,458	0,028	0,307
T2	24	0,391	0,249	0,304	0,210	0,012	0,233
T3	52	0,100	0,127	0,058	0,033	0,014	0,066
T4	84	0,098	0,086	0,034	0,013	0,007	0,048
T5	146	0,136	0,050	0,036	0,014	0,009	0,049

Apêndice F - Profundidade total do fluxo, tensão cisalhante da enxurrada e coeficiente de rugosidade de Manning (nr) nos diferentes tratamentos em cada teste de chuva simulada, valores médios de cada tratamento, média de cada teste de chuva (T), em um Cambissolo Húmico.

(continua)

Teste	Dias após T1	Tratamento					Média
		SRA	SRE	SEA	SEE	SDE	
		Coeficiente de rugosidade de Manning					
		nr					
T6	245	0,074	0,031	0,018	0,020	0,011	0,031
T7	321	0,032	0,013	0,012	0,016	0,007	0,016
T8	367	0,017	0,015	0,013	0,009	0,011	0,013
Média		0,148	0,105	0,115	0,097	0,012	

SRA: solo cultivado e coberto por resíduos de azevém; SRE: solo cultivado e coberto por resíduos de ervilhaca; SEA: solo cultivado com azevém e escarificado com suas raízes; SEE: solo cultivado com ervilhaca e escarificado com suas raízes; SDE: solo sem cultivo, descoberto, escarificado.

Fonte: Próprio autor.