

**FABRÍCIO TONDELLO BARBOSA**

**COMPRIMENTO CRÍTICO DE DECLIVE DETERMINADO POR MEIO  
DE EROSÃO HÍDRICA EM DUAS DIREÇÕES DE SEMEADURA  
DIRETA SOBRE DUAS DOSES DE RESÍDUOS CULTURAIS DE  
MILHO, TRIGO E SOJA NUM NITOSSOLO**

**LAGES, SC**

**2011**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DOUTORADO EM MANEJO DO SOLO**

**FABRÍCIO TONDELLO BARBOSA**

**COMPRIMENTO CRÍTICO DE DECLIVE DETERMINADO POR MEIO  
DE EROÇÃO HÍDRICA EM DUAS DIREÇÕES DE SEMEADURA  
DIRETA SOBRE DUAS DOSES DE RESÍDUOS CULTURAIS DE  
MILHO, TRIGO E SOJA NUM NITOSSOLO**

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

**Orientador:** Dr. Ildegardis Bertol

**Co-orientador:** Dr. Álvaro Luiz Mafra

**Co-orientador:** PhD. Neroli Pedro Cogo

**LAGES, SC**

**2011**

**FABRÍCIO TONDELLO BARBOSA**

**COMPRIMENTO CRÍTICO DE DECLIVE DETERMINADO POR MEIO  
DE EROSÃO HÍDRICA EM DUAS DIREÇÕES DE SEMEADURA  
DIRETA SOBRE DUAS DOSES DE RESÍDUOS CULTURAIS DE  
MILHO, TRIGO E SOJA NUM NITOSSOLO**

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

Aprovado em: / /2011

Homologado em: / /2011

**Banca Examinadora:**

---

**Orientador/presidente:** Dr. Ildegardis Bertol  
(UDESC/Lages - SC)

---

Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
Coordenador Técnico do Curso de Doutorado  
em Manejo do Solo e Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Agrárias – UDESC/Lages – SC

---

**Co-orientador/membro:** Dr. Álvaro Luiz  
Mafra (UDESC/Lages - SC)

---

**Co-orientador/membro:** PhD. Neroli Pedro  
Cogo (UFRGS/Porto Alegre - RS)

---

Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias  
Diretor Geral do Centro de Ciências  
Agroveterinárias – UDESC/Lages - SC

---

**Membro:** Dr. David José Miquelluti  
(UDESC/Lages - SC)

---

**Membro:** Dr. Luciano da Silva Souza  
(UFRB/Cruz das Almas - BA)

Lages, Santa Catarina  
26 de Agosto de 2011

A meus pais, Alziro Zarske Barbosa e Nair Justina Tondello Barbosa, pelo incentivo e ensinamentos passados,

**Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde, oportunidades concedidas e conforto nos momentos difíceis.

Ao professor Ildegardis Bertol, excelente profissional e pessoa, pela orientação, amizade e convivência de vários anos, desde a graduação.

Aos meus pais, Alziro e Nair, exemplos de honestidade, fé, humildade e força de vida, além da confiança depositada em mim.

Ao meu irmão Éderson, grande Engenheiro Agrônomo, pela confiança, incentivo e amizade; e também a minha irmã Kelen.

A Vanessa, minha namorada, que admiro e respeito muito.

A Rodrigo Vieira Luciano, amigão de república.

Aos bolsistas de iniciação científica, mestrandos e doutorandos do laboratório de Uso e Conservação do Solo, antes de tudo amigos, pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa. Aos professores do Departamento de Solos, e, em especial, ao professor Olívio José Soccol e aos laboratoristas Fátima e Henrique.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A UDESC, pela formação profissional, na graduação e no mestrado.

## RESUMO

Na semeadura direta, o resíduo cultural tem sua eficiência reduzida na proteção do solo contra a erosão hídrica se forem transportados pela enxurrada e/ou se a enxurrada sulcar o solo. A distância no terreno onde isso ocorre caracteriza o comprimento crítico de declive, que pode ser utilizado como guia na alocação e no espaçamento entre terraços agrícolas. O trabalho objetivou definir comprimentos críticos de declive em duas formas de semeadura direta, para três tipos e duas doses de resíduos culturais. A pesquisa foi realizada no Planalto Sul Catarinense, num Nitossolo Bruno. Testaram-se a semeadura mecanizada em linhas em contorno ao declive e morro abaixo, os resíduos de milho, trigo e soja e as doses de 50% e 100% do total produzido. Aplicou-se chuva simulada de  $65 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo que, quando a enxurrada atingiu taxa constante, foram adicionados níveis de fluxo extra de água na extremidade superior das parcelas, simulando a enxurrada proveniente de comprimentos maiores que o da parcela. Para a detecção do comprimento crítico, utilizou-se a relação taxa de erosão ( $D_p$ ) x taxa de enxurrada ( $q_m$ ). Além disso, a falha dos resíduos foi observada visualmente quando ocorreu. Em todos os tratamentos detectou-se o comprimento crítico de declive, sendo que, a semeadura em contorno e a maior dose dos resíduos de milho, trigo e soja aumentaram o comprimento crítico em relação à semeadura morro abaixo e à menor dose, respectivamente. Tais comprimentos variaram entre 35 e 155 m. A falha visual no campo foi possível de ser identificada para o resíduo de milho e soja, enquanto que para o trigo, não foi possível com clareza.

**Palavras-chave:** Semeadura direta. Falha dos resíduos culturais. Cultivo em contorno. Chuva simulada.

## ABSTRACT

In no-till, the crop residue has reduced its effectiveness in protecting the soil against erosion if they are transported by runoff and/or if the flood furrowing the soil. The distance on the ground where it occurs characterizes the critical slope length, which can be used as a guide in the allocation and the spacing between agricultural terraces. The study aimed to establish critical slope lengths in two forms of direct seeding for three types and two levels of crop residues. The survey was conducted in the Southern Plateau of Santa Catarina, in an HAPLUDOX. Were tested mechanized planting contour lines in the downhill slope and the waste of corn, wheat and soybeans and the rates of 50% and 100% of total production. We applied simulated rainfall of  $65 \text{ mm h}^{-1}$ , and when the flood reached a constant rate, have added extra levels of water flow at the upper end of the plots, simulating runoff from greater lengths than the plot. For the detection of critical length, we used the ratio of erosion rate ( $D_p$ ) x runoff rate ( $q_m$ ). Moreover, the failure of the waste was observed visually when it occurred. In all treatments were found to be the critical slope length, and, wrap, and seeding the highest dose of corn stover, wheat and soybeans increased the length critical of the downhill seeding and the lowest dose, respectively. Such lengths ranging between 35 and 155 m. The flaw in the visual field could be identified for the residue of corn and soybeans, while for wheat it was not possible clearly.

**Keywords:** No-tillage. Failure of the mulch. Contour tillage. Simulated rainfall.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização do solo: granulometria, argila dispersa em água, densidade de partículas ( $D_p$ ), densidade aparente do solo ( $D_s$ ), porosidade total do solo ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ), microporosidade ( $M_i$ ), carbono orgânico do solo ( $C_{org}$ ) e diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP) .....	38
Tabela 2 -	Intensidade e volume real das chuvas simuladas aplicadas nos tratamentos estudados, nos experimentos realizados sobre o resíduo cultural de milho, trigo e soja .....	40
Tabela 3 -	Cobertura do solo (%) pelos resíduos culturais de milho, trigo e soja, nos diferentes tratamentos, antes e após a operação de semeadura mecanizada antecedente à chuva e após chuva simulada com adição dos fluxos extras de água .....	46
Tabela 4 -	Umidade volumétrica no solo ( $U_v$ ) nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m e saturação dos poros por água (SP), na camada de 0-0,2 m de solo, antecedente às chuvas simuladas aplicadas nos experimentos realizados sobre os resíduos de milho, trigo e soja, nos tratamentos estudados.....	47
Tabela 5 -	Taxa constante de enxurrada ajustada para 65 mm $h^{-1}$ ( $q_c$ ), nos diferentes tratamentos, sob chuva simulada de 90 min de duração, em parcelas com declividade média de 0,144 m $m^{-1}$ no teste de chuva realizado sobre os resíduos de milho, trigo e soja.....	48
Tabela 6 -	Taxa constante de enxurrada da chuva inicial - $q_c$ ( $m^3 s^{-1} m^{-1} 10^{-3}$ ); fluxo extra de água adicionada na extremidade superior da parcela - $q_a$ ( $m^3 s^{-1} m^{-1} 10^{-3}$ ) e comprimento equivalente de declive simulado - $L_e$ (m), nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja.....	51
Tabela 7 -	Nível crítico de fluxo extra (anterior a falha); taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental crítico ( $q_m$ ); critérios que identificaram o ponto de falha e comprimento crítico de declive, nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja.....	82
Tabela 8 -	Comprimento de rampa crítico pelo critério da falha dos resíduos e da tolerância de perda de solo, nos diferentes tratamentos, nos experimentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja, num Nitossolo Bruno.....	86



Tabela 9 -	Nível crítico de fluxo extra (anterior a falha); profundidade total do fluxo e tensão crítica de cisalhamento, nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja.....	86
------------	---	----

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - a) Unidade experimental delimita nas laterais e parte superior por chapas galvanizadas e na parte inferior por calha coletora de escoamento; b) vista do simulador de chuvas operando sobre duas unidades experimentais. Na mesma figura, observa-se a calha coletora de enxurrada conectada ao tubo de PVC que conduzia o fluxo até a câmara com vertedor alocado na trincheira..... 26
- Figura 2 - a) Vista lateral do simulador de chuvas de braços rotativos tipo Swanson; b) controle da intensidade de chuva realizado através de registro e manômetro localizados próximo a entrada de água no simulador..... 27
- Figura 3 - a) Fluxo extra de água adicionado na extremidade superior de uma parcela simulando comprimento de rampa maior; b) detalhe dos registros utilizados para controlar a entrada de água pelo fluxo extra nas parcelas experimentais. Na figura, também é possível observar os pluviômetros instalados para medição do volume e intensidade real das chuvas aplicadas, anterior a adição dos fluxos extras..... 28
- Figura 4 - a) Câmara com vertedor triangular para medir vazão; b) piezômetro utilizado para realizar as leituras de vazão no vertedor..... 29
- Figura 5 - Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 1, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural do milho. a) semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (C-M<sub>1/1</sub>); b) semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (C-M<sub>1/2</sub>); c) semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (P-M<sub>1/1</sub>); d) semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (P-M<sub>1/2</sub>)..... 31
- Figura 6 - Semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural do trigo com utilização de hastes sulcadoras. a) parcela com 100% da dose de resíduo; b) parcela com 50% da dose de resíduo..... 33
- Figura 7 - Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 2, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural de trigo. a) semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (C-T<sub>1/1</sub>); b) semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (C-T<sub>1/2</sub>); c) semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (P-T<sub>1/1</sub>); d)

	semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (P-T <sub>1/2</sub> ).....	34
Figura 8 -	Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 3, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural de soja. a) semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (C-S <sub>1/1</sub> ); b) semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (C-S <sub>1/2</sub> ); c) semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (P-S <sub>1/1</sub> ); d) semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (P-S <sub>1/2</sub> ).....	36
Figura 9 -	Determinação da cobertura do solo pelo método da corda marcada, anterior a operação de semeadura em uma das parcelas morro abaixo sobre resíduo de trigo.....	37
Figura 10 -	Medição da taxa de enxurrada na chuva anterior aos fluxos extras.....	39
Figura 11 -	Detalhe da mobilização do solo na linha de semeadura. a) uso de semeadora equipada com discos de corte na dose integral do resíduo de milho; b) uso de semeadora equipada com discos de corte e hastes sulcadoras na dose integral do resíduo de trigo; c) uso de semeadora equipada com discos de corte na dose integral do resíduo de soja.....	49
Figura 12 -	Taxa de descarga adicionada na extremidade superior das parcelas e correspondente nível de fluxo extra, nos diferentes tratamentos. a) experimento 1, resíduo de milho; b) experimento 2, resíduo de trigo; c) experimento 3, resíduo de soja.....	52
Figura 13 -	Relação entre a taxa de erosão (D <sub>p</sub> ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q <sub>m</sub> ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho.....	63
Figura 14 -	Relação entre a taxa de erosão (D <sub>p</sub> ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q <sub>m</sub> ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo.....	64
Figura 15 -	Relação entre a taxa de erosão (D <sub>p</sub> ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q <sub>m</sub> ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja.....	65
Figura 16 -	Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q <sub>m</sub> ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho.....	70
Figura 17 -	Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q <sub>m</sub> ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo.....	71

Figura 18 -	Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja.....	72
Figura 19 -	Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho.....	73
Figura 20 -	Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo.....	74
Figura 21 -	Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja.....	75
Figura 22 -	Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho.....	83
Figura 23 -	Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo.....	84
Figura 24 -	Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja.....	85

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>3 HIPÓTESES.....</b>	<b>23</b>
<b>4 OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
<b>5 MATERIAL &amp; MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
5.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	25
5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL.....	25
5.3 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	26
5.4 CHUVA SIMULADA.....	27
5.5 FLUXO EXTRA DE ÁGUA NA EXTREMIDADE SUPERIOR DAS PARCELAS..	28
5.6 CÂMARA COM VERTEDOR MEDIDOR DE VAZÃO.....	29
5.7 EXPERIMENTO 1. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE MILHO ( <i>Zea mays</i> ).....	29
5.7.1 Manejo da cultura e do resíduo .....	29
5.7.2 Tratamentos.....	30
5.8 EXPERIMENTO 2. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE TRIGO ( <i>Triticum aestivum</i> ).....	31
5.8.1 Manejo da cultura e do resíduo .....	31
5.8.2 Tratamentos.....	33
5.9 EXPERIMENTO 3. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE SOJA (( <i>Glicine max</i> )).....	34
5.9.1 Manejo da cultura e do resíduo .....	34
5.9.2 Tratamentos.....	35
5.10 REALIZAÇÃO DOS TESTES DE CHUVA SIMULADA.....	36

5.11 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS.....	37
5.12 DETERMINAÇÕES ANTERIORES À APLICAÇÃO DAS CHUVAS.....	37
5.12.1 Cobertura do solo por resíduos culturais.....	37
5.12.2 Teor de água no solo.....	39
5.13 DETERMINAÇÕES EFETUADAS, EM FUNÇÃO DAS CHUVAS SIMULADAS DE 90 MINUTOS.....	39
5.13.1 Taxa instantânea de enxurrada.....	39
5.13.2 Intensidade e volume real das chuvas.....	39
5.13.3 Taxa constante de enxurrada.....	40
5.14 EXPERIMENTO 1. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE MILHO ( <i>Zea mays</i> ).....	41
5.14.1 Taxa de enxurrada.....	41
5.14.2 Concentração de sedimentos.....	41
5.14.3 Velocidade de enxurrada.....	41
5.14.4 Taxa média de erosão.....	42
5.14.5 Ajuste das perdas de solo para cada nível de fluxo extra.....	42
5.14.6 Erosividade da chuva durante os níveis de fluxo extra.....	42
5.14.7 Perda de solo por unidade de $EI_{30}$ .....	43
5.14.8 Taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental.....	43
5.14.9 Comprimento equivalente de declive.....	43
5.14.10 Tensão crítica de cisalhamento.....	44
5.14.11 Regressões.....	44
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
6.1 COBERTURA DO SOLO POR RESÍDUOS CULTURAIS (CR).....	45
6.2 TEOR DE ÁGUA NO SOLO ANTECEDENTE ÀS CHUVAS.....	46
6.3 TAXA CONSTANTE DE ENXURRADA ( $q_c$ ) DA CHUVA DE 90 min.....	47
6.4 NÍVEIS DE FLUXO EXTRA DE ÁGUA ADICIONADOS NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS.....	49
6.5 COMPRIMENTOS DE DECLIVE SIMULADOS.....	50
6.6 OBSERVAÇÃO VISUAL DA FALHA DOS RESÍDUOS CULTURAIS.....	53
6.7 RELAÇÕES COM BASE EM TEORIA DE EROSÃO.....	57
6.7.1 Relação taxa de erosão ( $D_p$ ) x taxa de descarga ( $q_m$ ).....	57
6.7.2 Relação concentração de sedimentos na enxurrada (C) x taxa de descarga ( $q_m$ ).....	66
6.7.3 Relação velocidade de enxurrada (V) x taxa de descarga ( $q_m$ ).....	68
6.8 COMPRIMENTOS CRÍTICOS DE DECLIVE.....	78

6.9 COMPARATIVO ENTRE TOLERÂNCIA DE PERDA DE SOLO E FALHA DOS RESÍDUOS.....	79
6.10 TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO.....	80
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, aumentou a área cultivada sob sistemas de manejo conservacionista de solo no Brasil, em especial a semeadura direta. Ao lado disso, entre agricultores e técnicos de campo, especialmente, tem-se disseminado a idéia de que a mesma, por si só, controla eficazmente a erosão hídrica pluvial. No entanto, observa-se, tanto cientificamente em experimentos de pesquisa, quanto empiricamente em lavouras, que muitas vezes a erosão hídrica ocorre em grande magnitude, representando perdas econômicas, diminuição da capacidade produtiva das terras agrícolas e contaminação ambiental fora do local de origem da erosão. Isso decorre da ineficiência da semeadura direta em controlar adequadamente a erosão em determinadas situações e da não adoção de práticas conservacionistas complementares para controle da enxurrada nesse sistema de manejo. A ausência de práticas conservacionistas de suporte, em especial o terraceamento, induz o cultivo do solo realizando as operações de manejo em direção ao maior comprimento da gleba, independentemente do declive ou no sentido da pendente do terreno, o que contribui fortemente para o aumento da erosão hídrica na semeadura direta. Além do mais, a semeadura direta pode resultar em baixas quantidades de resíduos na superfície do solo, contribuindo para a ineficiência desse sistema no controle da erosão hídrica. Portanto, é necessário determinar cientificamente limites de comprimento de declive em tal forma de manejo, visando detectar situações em que ele ocorre e, com isso, subsidiar o planejamento de práticas conservacionistas de suporte para manejo de enxurrada, em especial, o terraceamento agrícola.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O CONTROLE DA EROÇÃO HÍDRICA**

O controle da erosão hídrica pluvial do solo pelos sistemas de manejo conservacionista depende da eficiência dos resíduos culturais em proteger a superfície do solo, entre outros fatores. Esses resíduos perdem sua eficácia no controle da erosão quando transportados pela enxurrada, ou, quando a enxurrada, mesmo sem remover o resíduo, erode o solo por baixo do mesmo. A esse fenômeno se denomina falha do resíduo (Foster et al., 1982). No momento em que ocorre a falha, a tensão de cisalhamento total do fluxo superficial supera a resistência oferecida pelos resíduos culturais e passa a deslocá-los e/ou supera a resistência oferecida pelo solo, passando a promover aumento na erosão em sulcos. A tensão cisalhante da enxurrada é dependente do peso específico da enxurrada, da lâmina de escoamento e da declividade do terreno, enquanto, a tensão crítica de cisalhamento representa a tensão máxima do fluxo superficial na qual o solo ou o resíduo podem suportar, sem que haja o fenômeno da falha. Portanto, a falha do resíduo cultural caracteriza o comprimento crítico de declive, o qual estabelece a distância no terreno desde o início da enxurrada até o ponto na superfície do solo em que ocorre a perda da eficácia relativa do resíduo em reduzir a erosão hídrica (Foster et al., 1982).

Em função da perda de eficácia dos resíduos em diminuir a erosão, os valores para o fator C (cobertura e manejo do solo), utilizados na Equação Universal de Perda do Solo - EUPS (Wischmeier & Smith, 1978) e na Equação Universal de Perda do Solo Revisada - EUPSR (Renard et al., 1997) não são mais aplicáveis a partir do ponto de falha, devido ao

aumento do fator C do modelo. A predição do fator C destes modelos é afetada ainda pelo aumento do valor do expoente do fator L (comprimento do declive), também devido ao aumento da erosão em sulcos em relação à erosão em entre sulcos quando ocorre a falha do resíduo (Foster et al., 1982).

Estudos com comprimentos críticos de declive para determinadas condições de manejo de solo fornecem parâmetros que podem ser utilizados no dimensionamento e no espaçamento de terraços agrícolas em sistemas de semeadura direta (Bertol & Cogo, 1996), além de outras práticas conservacionistas complementares. Durante longo tempo, o terraço agrícola foi adotado como principal prática de conservação de solo em preparos convencionais, caracterizados por baixa rugosidade na superfície, elevada compactação e baixa porosidade logo abaixo da camada preparada e ausência de cobertura superficial, o que resultava em baixa infiltração e elevada enxurrada. Nesse tipo de preparo, foram estabelecidos espaçamentos entre terraços baseados em fórmulas empíricas, que levavam em conta principalmente a declividade do terreno e o tipo de solo. Terraços dimensionados a partir desses espaçamentos, muitas vezes não eram suficientes para determinadas condições de declive, solo, chuva, cultura e manejo do solo, sendo ineficazes, principalmente, pela excessiva degradação das propriedades físicas do solo, as quais regulam a hidráulica do fluxo superficial (Foster, 1982).

O surgimento da semeadura direta que preserva os resíduos culturais na superfície e reduz a degradação das propriedades físicas do solo, embora reduza a rugosidade superficial, modificou esse panorama. Esse sistema de manejo melhora a infiltração de água no solo e diminui a enxurrada e, ainda, reduz substancialmente a área de solo exposta ao impacto das gotas de chuva em relação ao preparo convencional. Na semeadura direta aumentam os tempos de início e de pico e diminui o volume e a velocidade da enxurrada, decorrente do

aumento da infiltração de água no solo, em relação ao preparo convencional (Cogo, 1981; Bertol, 1995; Morais, 1999).

O processo de erosão hídrica pluvial do solo ocorre em três fases distintas e concomitantes: desagregação, ocasionada principalmente pela energia das gotas da chuva; transporte, promovido principalmente pela energia do fluxo em sulcos; e deposição, sempre que a carga de sedimentos no fluxo excede sua capacidade de transporte (Ellison, 1947; Winschmeier & Smith, 1958). No entanto, as gotas de chuva e a enxurrada, isoladas, são agentes completos que causam erosão, pois, ambos, desagregam e transportam sedimentos. Na semeadura direta, a cobertura do solo pode ser capaz de dissipar praticamente toda a energia proveniente das gotas de chuva, mas a mesma não consegue dissipar por completo a energia da enxurrada, a qual, em determinadas situações, como de chuvas críticas em longos comprimentos de rampa e declives acentuados, adquire energia suficiente para sulcar o solo e remover o resíduo (Denardin et al., 2005). No campo, a falha visual do resíduo pode ser visualizada, quando ocorre. No entanto, o sulcamento do solo que ocorre por baixo do resíduo, quando o resíduo não é removido, é difícil de ser detectado. Por isso, a detecção e quantificação deste fenômeno é imprescindível por meio de critérios científicos, para que se possa planejar com segurança práticas complementares de controle do escoamento superficial no sistema de semeadura direta, quando necessário. A deficiência de dados quantitativos dessas variáveis revela a necessidade de se detectarem comprimentos críticos de declive para os diferentes manejos adotados na técnica de semeadura direta.

O sistema de manejo semeadura direta caracteriza-se por apresentar elevada cobertura por resíduos culturais ancorados, elevada compactação do solo na superfície e baixa rugosidade superficial (Cogo, 1981; Bertol, 1995; Bertol et al., 1997; Morais & Cogo, 2001). Devido aos resíduos ancorados e à compactação superficial, o sistema apresenta maior comprimento crítico de declive do que o manejo convencional do solo. Em função disso, a

energia do fluxo necessária para promover a falha dos resíduos na semeadura direta é maior do que a energia necessária para sulcar o solo no preparo convencional. A semeadura direta pode ainda incorporar parcialmente (ancorar) os resíduos culturais na camada superficial do solo por ocasião da operação de semeadura (Bertol et al., 1997). Resíduos semi-incorporados e ancorados na superfície controlam a erosão hídrica mais eficazmente do que resíduos não incorporados e soltos na superfície (Foster et al., 1982), pois dificultam a flutuação do resíduo no fluxo de água e, por isso, aumentam a tensão de cisalhamento necessária para que o fluxo remova o resíduo (Foster, 1982; Foster et al., 1982). No entanto, o aumento da suscetibilidade do solo à erosão em sulcos, como resultado da semeadura morro a baixo, na semeadura direta, pode reduzir os benefícios proporcionados pelo ancoramento (incorporação parcial) do resíduo, no que se refere à dificuldade de sua remoção superficial. Isso pode ocorrer porque parte da superfície fica descoberta e exposta à energia cisalhante da chuva e enxurrada e porque os sulcos ficam direcionados à pendente.

A diminuição da rugosidade superficial e o aumento da quantidade de resíduos culturais e da compactação da superfície do solo tendem a acentuar-se à medida que aumenta o tempo de condução do sistema. O aumento da biomassa na superfície do solo aumenta a tensão de cisalhamento da enxurrada necessária para promover a remoção do resíduo (Foster et al., 1982), o que tende a aumentar o comprimento crítico do declive. Esta mesma tendência pode ocorrer com o aumento da compactação da superfície do solo, exigindo maior energia de cisalhamento da enxurrada para sulcar o solo (Foster, 1982). No entanto, como a superfície do solo apresenta-se menos rugosa na semeadura direta (Cogo, 1981; Bertol, 1995), esta pode oferecer menor resistência à mobilização do resíduo pela energia da enxurrada, quando comparada a superfícies mais rugosas de outros sistemas de manejo conservacionista de solo.

A detecção do ponto no terreno onde ocorre a falha do resíduo, determinando o comprimento crítico de declive, pode ser feita por meio de duas formas, sendo elas a

observação visual a campo e a análise da teoria de erosão. Da teoria de erosão, analisam-se as relações entre taxa de perda de solo e taxa de descarga, entre concentração de sedimentos na enxurrada e taxa de descarga e entre velocidade do fluxo e taxa de descarga (Foster et al., 1982). A escolha do momento em que a taxa de descarga ocasiona falha no resíduo é subjetiva pela observação visual e, por isso, os dados são examinados utilizando as relações já mencionadas, as quais serão descritas a seguir.

#### a) Taxa de erosão x taxa de descarga

A taxa de erosão ( $D$ ) é dependente dos coeficientes de erodibilidade do solo em sulcos ( $K_s$ ) e entre sulcos ( $K_e$ ), dos fatores cobertura e manejo do solo em sulcos ( $C_s$ ) e entre sulcos ( $C_e$ ), da taxa de enxurrada ( $q$ ), do comprimento do declive ( $X$ ) e da intensidade da chuva ( $i$ ), expressa pela equação:

$$D = (K_s C_s q X) + (K_e C_e i^2) \quad (1)$$

Da equação da continuidade, obtém-se a carga de sedimentos ( $G$ ) para erosão em condições de estado de equilíbrio da enxurrada, pela equação:

$$G = \int D dx$$

Com isso, obtém-se a produção de sedimentos numa parcela experimental ( $G_p$ ), pela equação:

$$G_p = \Delta X (K_s C_s q_m + K_e C_e i^2); \quad (2)$$

Onde  $q_m$  é a taxa de enxurrada no centro da parcela.

A taxa de erosão média da parcela ( $D_p$ ) é obtida pela equação:

$$D_p = (K_s C_s q_m) + (K_e C_e i^2) \quad (3)$$

Assumindo-se que  $K_s$ ,  $K_e$ ,  $C_s$ ,  $C_e$  e  $i$  são independentes de  $q_m$ ,  $D_p$  varia linearmente com  $q_m$ , então, obtém-se a equação:

$$D_p = K_s C_s q_m + C_2; \text{ logo: } C_2 = K_e C_e i^2 \quad (4)$$

Com isso,  $C_2$  é o coeficiente linear e o termo  $K_s C_s$  o coeficiente angular da reta resultante da relação entre  $D_p$  e  $q_m$ .

Dessa forma, a declividade da reta que relaciona  $D_p$  x  $q_m$  é expressa pela equação:

$$\Delta D_p / \Delta q_m = K_s C_s \quad (5)$$

Quando ocorre a falha do resíduo o fator  $C_s$  aumenta, aumentando a declividade da reta resultante de  $D_p$  x  $q_m$ . No entanto, nem sempre ocorre uma mudança abrupta na declividade dessa reta.

### **b) Concentração de sedimentos x taxa de descarga**

A segunda indicação de falha do resíduo é dada pela relação entre concentração de sedimentos na enxurrada ( $C$ ) e taxa de descarga ( $q_m$ ), expressa pela equação:

$$C = K_s C_s + C_2 / q_m \quad (6)$$

Até o momento de falha do resíduo, a concentração de sedimentos ( $C$ ) decresce com o aumento da taxa de descarga ( $q_m$ ). Quando a falha ocorre,  $C_s$  aumenta, aumentando também  $C$ .

### **c) Velocidade do fluxo x taxa de descarga**

A terceira indicação de falha do resíduo é a mudança de declividade da curva que representa a relação velocidade do fluxo ( $V$ ) e taxa de descarga ( $q_m$ ), expressa pela relação:

$$V = a q_m^b s^d \quad (7)$$

Onde  $a$  é um coeficiente que depende da rugosidade hidráulica,  $b$  e  $d$  são coeficientes de ajuste e  $s$  é o seno do ângulo do declive. Quando a falha ocorre, aumenta a declividade da curva  $V$  x  $q_m$ , devido à mudança no expoente  $b$  e/ou a mudança do coeficiente  $a$ .

Em trabalhos realizados no exterior, Cogo (1981) simulando comprimentos de declive de até 135 m em preparo de solo conservacionista com resíduos ancorados de trigo, não observou falha de resíduos. Foster et al. (1982), no entanto, observaram falha nos resíduos variando de 45 a 200 m, em solos não suscetíveis ao sulcamento e de 40 a 150 m em solos

suscetíveis ao sulcamento, utilizando colmos de milho e resíduos de trigo soltos na superfície do solo, sem ancoramento. Dos três trabalhos realizados no Brasil, Bertol et al. (1997) encontraram limites de comprimentos críticos de declive para a semeadura direta e escarificação, respectivamente, de 328 a 483 m e de 147 a 209 m, sobre os resíduos de milho e, quando cobertos pelos resíduos de trigo + milho, de 157 a 272 m e de 143 a 267 m. Na semeadura direta coberta por resíduo de trigo fresco e por resíduos de trigo + milho 140 dias após a colheita do trigo em superfície semeada, os autores encontraram que, tais comprimentos foram, respectivamente, de 106 a 143 m e de 87 a 174 m, em um Argissolo Vermelho Amarelo com declividade de  $0,066 \text{ m m}^{-1}$ . Moraes & Cogo (2001), no mesmo solo, trabalhando sobre os resíduos de milho, soja e aveia-preta em semeadura direta com  $0,105 \text{ m m}^{-1}$  de declividade, observaram a falha variando nos limites de 20 a 109 m sobre os resíduos de soja, de 99 a 110 m sobre resíduos da aveia preta e de 107 a 164 m sobre os resíduos de milho. Amaral (2010), estudando comprimentos críticos de declive em semeadura direta, com e sem uso de hastes sulcadoras acopladas à semeadora sob diferentes doses de resíduo cultural de milho em um Nitossolo Bruno, com declividade de  $0,160 \text{ m m}^{-1}$ , constatou a existência da falha do resíduo cultural apenas pelo critério da observação visual a campo, sendo comprovada apenas em um dos tratamentos a falha pelo critério das relações teóricas de erosão, atribuindo isso a problemas metodológicos que ocorreram durante a pesquisa. A falha ocorreu nos intervalos de 171 a 456 m e de 64 a 118 m, com e sem hastes sulcadoras, respectivamente, não encontrando uma tendência definida quanto às doses do resíduo de milho.

### **3 HIPÓTESES**

1. Na semeadura direta com superfície do solo compactada, ocorre a falha dos resíduos culturais, caracterizando o comprimento crítico de declive, independentemente da direção de semeadura, tipo e dose de resíduos culturais.

2. O ponto de falha dos resíduos culturais pode ser verificado pelo critério da observação visual e pelas relações teóricas de erosão.

3. A direção de semeadura no sentido transversal ao declive (em contorno) modifica o comprimento crítico de declive e a tensão crítica de cisalhamento para o solo e/ou para o resíduo em comparação com a semeadura paralela ao declive (morro abaixo).

4. O tipo de resíduo e a operação de semeadura, em conjunto, modificam o comprimento crítico de declive e a tensão crítica de cisalhamento.

5. Para o mesmo tipo de resíduo, a quantidade na superfície do solo modifica o comprimento crítico de declive e a tensão crítica de cisalhamento.



#### **4. OBJETIVOS**

Definir comprimentos críticos de declive e obter a tensão crítica de cisalhamento para semeadura direta nas direções paralela (morro abaixo) e transversal (em contorno) ao declive, para os resíduos vegetais de milho, trigo e soja, nas doses de 50% e 100% do total produzido, por meio de critério visual da observação de falha dos resíduos culturais, em campo, e por meio de análise de indicadores baseados em teoria de erosão.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa, sob condições de chuva simulada, foi realizada no Centro de Educação Profissionalizante - CEDUP, em São José do Cerrito, SC, na região do Planalto Sul Catarinense, entre maio de 2009 e dezembro de 2010. As coordenadas do local são de 27°43' latitude Sul e 50°31' longitude oeste de Greenwich, com altitude de 800 m. O clima é do tipo Cfb (subtropical úmido, chuvoso e com verões frescos), segundo a classificação de Köppen. O relevo do local é ondulado a fortemente ondulado. O solo é um Nitossolo Bruno aluminoférrico húmico (EMBRAPA, 2006), de classe textural muito argiloso, cuja composição granulométrica média da camada superficial de 0-0,05 m de solo é de 62% de argila, 10% de silte e 28% de areia, com teor de carbono orgânico de 25 g kg<sup>-1</sup>.

Antes da implantação do experimento, a área encontrava-se sob uso agrícola, sendo cultivada há cinco anos em semeadura direta, sendo que, anteriormente a esse período, foi cultivada sob preparo convencional do solo. As culturas utilizadas no local, antecedente ao experimento, foram o feijão, o milho e a soja, durante o verão, e a aveia, a ervilhaca e o pousio com predomínio de azevém, durante o inverno. Em maio de 2009, para dar início à preparação da área para o experimento, foi semeada aveia em consórcio com ervilhaca sobre os resíduos culturais de feijão, com o intuito de aumentar o tempo de condução da semeadura direta antes do cultivo do milho, o qual era de interesse para fins da tese. Com isso, na época de realização do primeiro teste de chuva (experimento 1), realizado sobre os resíduos culturais do milho, a área estava há seis anos sendo cultivada sob semeadura direta.

### 5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

Na área experimental, os tratamentos foram distribuídos ao acaso, seguindo o delineamento inteiramente casualizado. Adotou-se um esquema fatorial 2x2, onde foram testadas duas direções de semeadura e duas doses de resíduo cultural, em duas repetições, totalizando oito unidades experimentais. O estudo foi dividido em três experimentos, sendo

cada um realizado em épocas diferentes e composto por um tipo específico de resíduo cultural. No primeiro experimento, foi testado o resíduo de milho, no segundo, o resíduo de trigo e, no terceiro, o resíduo de soja.

### 5.3 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental tinha dimensões de 3,5 m de largura e 11 m de comprimento, conforme recomendações do IAPAR (1975), sendo delimitada nas laterais e extremidade superior por chapas galvanizadas com 0,2 m de altura, cravadas a 0,1 m de profundidade no solo. A extremidade inferior era delimitada por uma calha coletora de escoamento, a qual estava conectada a uma tubulação de PVC de 150 mm de diâmetro que permitia a condução do fluxo até uma câmara com vertedor medidor de vazão, situada 4,5 m abaixo (Figura 1). Para a instalação das unidades experimentais, foram demarcadas curvas de nível no local, uma na extremidade superior e, outra, na inferior, com auxílio de um nível de precisão, com o objetivo de melhor alocar as parcelas e direcioná-las, em seu comprimento, para o sentido do declive do terreno e, com isso, impedir que ocorressem inclinações laterais no terreno compreendido em cada uma delas. A declividade média das parcelas era de  $0,144 \text{ m m}^{-1}$ , com variação de  $0,135$  a  $0,151 \text{ m m}^{-1}$  entre uma parcela e outra.

A calha coletora de enxurrada apresentava 0,2 m de altura e, por isso, a primeira chapa galvanizada cravada logo após a calha, em ambos os lados da parcela, apresentava dimensão diferenciada das demais, ou seja, largura de 0,30 m cravada 0,10 m no solo. Isso foi adotado, para evitar que a lâmina de escoamento ao final das parcelas, decorrente da adição dos fluxos extras de água, extravasasse por cima da chapa ou da calha. Entre a calha e a chapa, foi feita a impermeabilização com uso de espuma expansiva, para evitar perda de água da enxurrada por aquele espaço.



Figura 1 - **a)** Unidade experimental delimita nas laterais e parte superior por chapas galvanizadas e na parte inferior por calha coletora de escoamento; **b)** vista do simulador de chuvas operando sobre duas unidades experimentais. Na mesma figura, observa-se a calha coletora de enxurrada conectada ao tubo de PVC que conduzia o fluxo até a câmara com vertedor alocado na trincheira.

## 5.4 CHUVA SIMULADA

Para a realização das chuvas simuladas, utilizou-se um aparelho simulador de chuva de braços rotativos (SWANSON, 1965) que cobria simultaneamente duas unidades experimentais, distanciadas entre si em 3,5 m (Figura 2a). O aparelho era composto por 10 braços de 7,5 m de comprimento, distribuídos radialmente em uma torre central. A área total de abrangência do simulador era de 200 m<sup>2</sup>. Nos braços haviam 30 bicos distribuídos de forma helicoidal, formando uma espiral concêntrica, sendo que para a realização das chuvas foram usados 15 bicos abertos. Os bicos aspersores usados para produzir a chuva artificial eram do tipo VEEJET 80/100 (MEYER & McCUNE, 1958).

Sobre os tratamentos, foi aplicada chuva simulada com duração de 90 min e intensidade constante e planejada de 65 mm h<sup>-1</sup>. A intensidade das chuvas foi controlada por meio de um manômetro, localizado a aproximadamente 6 m da entrada de água do simulador, operando com pressão de 12,3 psi (0,87 kgf cm<sup>-2</sup>). O ajuste da pressão necessária para se conseguir a intensidade de chuva planejada, foi realizado manualmente, abrindo ou fechando o registro localizado na tubulação próxima ao aparelho simulador de chuva (Figura 2b). A fonte de água era proveniente de um rio próximo ao local, onde a água era captada por um conjunto motobomba e conduzida até o simulador por meio de tubulação de PVC de encaixe rápido, de 75 mm de diâmetro.

A chuva de 90 min tinha como propósito obter a taxa constante de enxurrada, para com isso, ser possível simular comprimentos de declive maiores com a adição de fluxos extras de água na cabeceira das parcelas.



Figura 2 - a) Vista lateral do simulador de chuvas de braços rotativos tipo Swanson; b) controle da intensidade de chuva realizado através de registro e manômetro localizados próximo a entrada de água no simulador.

## 5.5 FLUXO EXTRA DE ÁGUA NA EXTREMIDADE SUPERIOR DAS PARCELAS

Imediatamente após os 90 min de chuva simulada, sem interrupção e mantendo-se o simulador de chuvas funcionando com a mesma intensidade de precipitação, foram adicionados simultaneamente fluxos extras de água na extremidade superior das parcelas. Para o experimento 1, foram planejados 6 níveis de fluxo extra: 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; e 3,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1} \times 10^{-3}$  (lê-se: metro cúbico por segundo por metro de largura da parcela). Com o intuito de melhorar a precisão nos experimentos 2 e 3, foram realizados 7 níveis de fluxo extra: 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 2,2 e 3,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1} \times 10^{-3}$ . Os fluxos extras de água, aplicados de forma crescente, tiveram duração de 9 min cada um, com a finalidade de simular comprimentos progressivamente mais longos do que o da unidade experimental (11 m), seguindo metodologia utilizada por Bertol (1995).

Para adicionar os fluxos, foi utilizada uma segunda linha de tubos de PVC de encaixe rápido (75 mm de diâmetro) e um segundo conjunto moto-bomba. Um tubo de derivação tipo “T”, acoplado a linha, direcionava o fluxo para duas parcelas ao mesmo tempo. Em cada parcela, a entrada de água ocorria por um tubo de 3,5 m de comprimento, contendo 67 orifícios de diâmetro de 10 mm e espaçamento central entre eles de 50 mm (Figura 3a). Para reduzir a pressão da água que entrava nas parcelas, o tubo foi revestido por outro tubo de PVC de 100 mm de diâmetro com o mesmo número e diâmetro de orifícios do tubo revestido. Além disso, a superfície do solo que recebia o jato de água dos orifícios foi protegida por uma chapa galvanizada. Isso fez com que a água, após sofrer impacto na superfície da chapa, entrasse na parcela por escoamento laminar. Dois registros, um em cada lado do tubo de derivação, regulavam a vazão do fluxo de água nas parcelas (Figura 3b).



Figura 3 - **a)** Fluxo extra de água adicionado na extremidade superior de uma parcela simulando comprimento de rampa maior; **b)** detalhe dos registros utilizados para controlar a entrada de água pelo fluxo extra nas parcelas experimentais. Na figura, também é possível observar os pluviômetros instalados para medição do volume e intensidade real das chuvas aplicadas, anterior a adição dos fluxos extras.

## 5.6 CÂMARA COM VERTEDOR MEDIDOR DE VAZÃO

A câmara com vertedor, utilizada para medição da enxurrada após a adição dos níveis de fluxo extra de água, é mostrada na figura 4. A câmara tinha dimensões de 1,6 m de comprimento, 0,4 m de largura e 0,4 m de altura, sendo que na extremidade oposta ao vertedor, a câmara possuía profundidade de 0,7 m, para fins de amortecimento e redução da velocidade da enxurrada proveniente do tubo de PVC acoplado a parcela experimental. A câmara foi confeccionada com chapa galvanizada de 0,95 mm de espessura. O vertedor era triangular tipo Thompson (com ângulo de abertura de 90°). A câmara e o vertedor foram dimensionados pelo professor Dr. Olívio José Soccol, do laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem, da UDESC. A altura de leitura do vertedor era de até 0,18 m, o qual podia medir vazão de até 19,3 L s<sup>-1</sup> que correspondia a 5,5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> x 10<sup>-3</sup>, sendo sua leitura feita em um piezômetro acoplado na lateral da câmara, a uma distância de 0,4 m do vertedor. Para o cálculo da vazão, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$Q = 1,4 H^{5/2}$$

Onde Q é a vazão no vertedor (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) e H é a altura da lâmina de água no triângulo do vertedor, medido no piezômetro (m).



Figura 4 - a) Câmara com vertedor triangular para medir vazão; b) piezômetro utilizado para realizar as leituras de vazão no vertedor.

## 5.7 EXPERIMENTO 1. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE MILHO (*Zea mays*)

### 5.7.1 Manejo da cultura e do resíduo

Em outubro de 2009, sobre os resíduos do consórcio de aveia e ervilhaca, foi realizada a semeadura mecanizada de milho, respeitando a orientação de semeadura (em contorno e morro abaixo) conforme sorteio prévio dos tratamentos em cada parcela. O espaçamento da

cultura nas entre linhas foi de 0,8 m, com deposição de cinco sementes por metro de linha de semeadura, resultando em estande de 62.500 plantas  $\text{ha}^{-1}$ . A adubação foi feita conforme a recomendação para a cultura (CQFS RS/SC, 2004), sendo aplicados 400  $\text{kg ha}^{-1}$  da formulação 05-25-25 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O), incorporados na linha de semeadura. No estágio V5 (cinco folhas expandidas) de desenvolvimento da cultura, foram aplicados 85  $\text{kg ha}^{-1}$  de N na forma de uréia. Durante o ciclo do milho, foram efetuados tratos culturais periódicos, como eliminação de plantas invasoras manualmente e com herbicidas e controle de pragas com inseticidas. Na primeira quinzena do mês de maio de 2010, foi realizada a colheita manual do milho. No entanto, as plantas de milho foram mantidas eretas, em pé, até próximo a data de realização do teste de chuva, para evitar que as mesmas, em contato com o solo, sofressem decomposição acelerada. No dia 23 de junho de 2010, foi realizado o corte dos colmos com o auxílio de um facão, deixando-se apenas as soqueiras da cultura, em altura de aproximadamente 0,07 m da superfície do solo, sendo o restante removido das unidades experimentais. Fora das parcelas, o resíduo foi pesado e redistribuído, com o propósito de uniformização de sua quantidade nas parcelas, de acordo com a dose para cada uma. Para o retorno dos resíduos nas unidades experimentais, as plantas foram picadas em peças de 0,10 a 0,15 m de comprimento, para simular o processo de colheita realizado com colhedora. A produção de matéria seca do resíduo cultural de milho foi de 9.600  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Após o manejo do resíduo e antes do teste de chuva, foi realizada operação de semeadura mecanizada, sem o uso de sementes e adubos, com o propósito de deixar as marcas de preparo nas direções em contorno e morro abaixo, respeitando os tratamentos. A semeadora, própria para sementes de inverno, era composta por discos de corte desencontrados regulados para atuar em profundidade de 0,04 m e espaçamento entre linhas de 0,2 m (simulado para a cultura do trigo). Com isso, formaram-se marcas no sentido em contorno e morro abaixo, conforme o tratamento, além das soqueiras remanescentes da cultura do milho dispostas no mesmo sentido da operação de semeadura.

### 5.7.2 Tratamentos

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de milho (Figura 5), sendo descritos a seguir:

a) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com todo o resíduo (9.600  $\text{kg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (C-M<sub>1/1</sub>), o que resultou em quatorze fileiras de

soqueiras de colmos de milho e cinquenta e cinco sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

b) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com metade do resíduo ( $4.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**C-M<sub>1/2</sub>**), o que resultou em quatorze fileiras de soqueiras de colmos de milho e cinquenta e cinco sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

c) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com todo o resíduo ( $9.600 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**P-M<sub>1/1</sub>**), o que resultou em cinco fileiras de soqueiras de colmos de milho e dezoito sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela;

d) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com metade do resíduo ( $4.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de milho produzido (**P-M<sub>1/2</sub>**), o que resultou em cinco fileiras de soqueiras de colmos de milho e dezoito sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela.

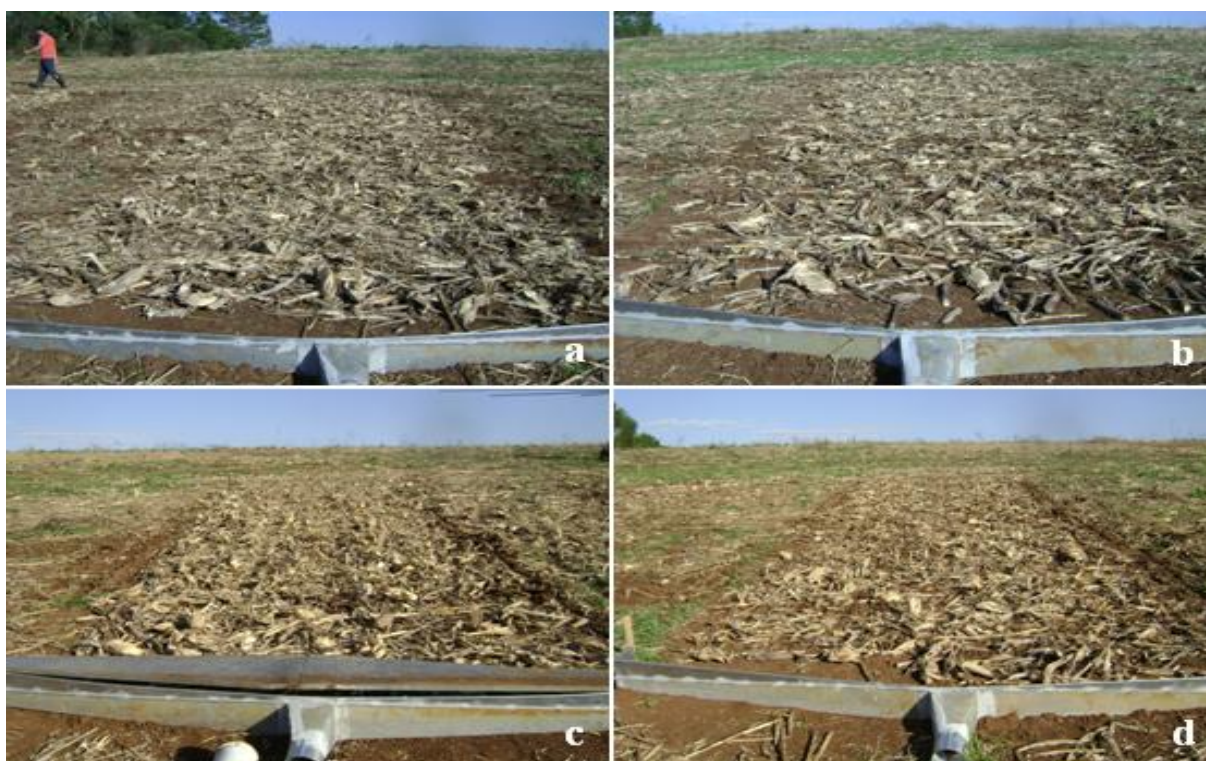


Figura 5 - Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 1, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural do milho. **a)** semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (**C-M<sub>1/1</sub>**); **b)** semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (**C-M<sub>1/2</sub>**); **c)** semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (**P-M<sub>1/1</sub>**); **d)** semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (**P-M<sub>1/2</sub>**).

## 5.8 EXPERIMENTO 2. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE TRIGO (*Triticum aestivum*)

### 5.8.1 Manejo da cultura e do resíduo



Após o teste de chuva sobre o resíduo de milho, foi realizada a correção dos sulcos formados nas unidades experimentais devido ao escoamento superficial da água, com o uso de enxada manual. No dia 29 de julho de 2010 foi realizada a semeadura do trigo, com uso de semeadora mecanizada com discos desencontrados e espaçamento entre linhas de 0,2 m, nas direções em contorno e morro abaixo, conforme o tratamento. O número de sementes por metro de linha de semeadura foi de 75, resultando em estande de 375.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> do adubo de formulação 07-30-15 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O), incorporados na linha de semeadura, conforme recomendação para a cultura (CQFS RS/SC, 2004). No início do estágio de perfilhamento do trigo, foram aplicados 50 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia. Durante o ciclo da cultura, foram realizados tratos culturais, como aplicação de herbicida, inseticida e fungicida, para o controle de invasoras, pragas e doenças, quando necessário.

No dia 22 de novembro de 2010, na fase final do florescimento e início de enchimento de grãos do trigo, realizou-se uma roçada, com roçadora costal, sendo o corte efetuado em duas etapas, ou seja, em duas alturas de corte, com o propósito de formar peças pequenas de resíduos, simulando uma colhedora. Foi deixada a soqueira da cultura em altura de aproximadamente 0,07 m da superfície do solo, e o restante do resíduo foi removido da superfície. Fora das parcelas, o resíduo foi pesado e redistribuído, conforme o tratamento (toda e metade da dose). A produção de matéria seca do resíduo de trigo foi de 3.600 kg ha<sup>-1</sup>.

Após o manejo do resíduo e antes do teste de chuva, foi realizada operação de semeadura mecanizada, sem o uso de sementes, com o propósito de deixar as marcas de preparo nas direções em contorno e morro abaixo, conforme os tratamentos. A semeadora era composta por discos de corte desencontrados e hastes sulcadoras, estas reguladas para atuar em profundidade de 0,08 m (Figura 6). O uso das hastes é comum na região, em culturas de verão, para melhorar o desenvolvimento inicial das plantas, devido à maior mobilização do solo na linha de semeadura e para incorporar o adubo em profundidade. O espaçamento entre linhas foi de 0,5 m (simulando a semeadura da soja). Com isso, formaram-se marcas de preparo no sentido em contorno e morro abaixo, além das soqueiras remanescentes da cultura do trigo dispostas no mesmo sentido da operação de semeadura.



Figura 6 - Semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural do trigo com utilização de hastes sulcadoras. a) parcela com 100% da dose de resíduo; b) parcela com 50% da dose de resíduo.

### 5.8.2 Tratamentos

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de trigo (Figura 7), sendo descritos a seguir:

a) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com todo o resíduo ( $3.600 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**C-T<sub>1/1</sub>**), o que resultou em cinquenta e cinco fileiras de soqueiras de colmos de trigo e vinte e dois sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

b) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com metade do resíduo ( $1.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**C-T<sub>1/2</sub>**), o que resultou em cinquenta e cinco fileiras de soqueiras de colmos de trigo e vinte e dois sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

c) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com todo o resíduo ( $3.600 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**P-T<sub>1/1</sub>**), o que resultou em dezoito fileiras de soqueiras de colmos de trigo e sete sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela;

d) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com metade do resíduo ( $1.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de trigo produzido (**P-T<sub>1/2</sub>**), o que resultou em dezoito fileiras de soqueiras de colmos de trigo e sete sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela.



Figura 7 - Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 2, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural de trigo. **a)** semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (C-T<sub>1/1</sub>); **b)** semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (C-T<sub>1/2</sub>); **c)** semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (P-T<sub>1/1</sub>); **d)** semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (P-T<sub>1/2</sub>).

### 5.9 EXPERIMENTO 3. TESTE DE CHUVA REALIZADO SOBRE O RESÍDUO CULTURAL DE SOJA (*Glicine max*)

#### 5.9.1 Manejo da cultura e dos resíduos

Após o teste de chuva sobre o resíduo de trigo (02-03/12/2010), foi realizada, com auxílio de enxada manual, a correção de sulcos formados nas unidades experimentais, devido aos fluxos extras adicionados e, após, foi realizada a semeadura da soja (10/12/2010), com o uso de “saraquá”, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, nas direções de semeadura em contorno e morro abaixo, conforme o tratamento. O número de sementes por metro de linha de semeadura foi de 16 e, para a adubação, foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 07-30-15 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O), incorporados na linha de semeadura, conforme recomendação para a cultura (CQFS RS/SC, 2004). Durante o desenvolvimento da soja, foram realizados tratos culturais, como aplicação de herbicida, inseticida e fungicida, para controle de doenças e pragas, quando necessário.

Ao final do ciclo de desenvolvimento da cultura, foi feita a colheita manual da soja com auxílio de foices, deixando apenas as soqueiras da cultura. As plantas foram trilhadas

para separação dos grãos e o resíduo foi pesado e redistribuído sobre a superfície do solo nas parcelas conforme o tratamento (toda e metade da dose). A produção de matéria seca do resíduo de soja foi de  $4.600 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Após o manejo do resíduo e antes do teste de chuva, foi realizada operação de semeadura mecanizada, sem o uso de sementes e adubos, com o propósito de deixar as marcas de preparo nas direções em contorno e morro abaixo, respeitando os tratamentos. A semeadora, própria para sementes de inverno, era composta por discos de corte desencontrados regulados para atuar em profundidade de 0,04 m e espaçamento entre linhas de 0,2 m. Com isso, formaram-se marcas no sentido em contorno e morro abaixo, além das soqueiras remanescentes da cultura da soja dispostas no mesmo sentido da operação de semeadura.

### 5.9.2 Tratamentos

Os tratamentos foram formados pela combinação de duas direções de semeadura direta e duas doses do resíduo cultural de milho (Figura 8), sendo descritos a seguir:

a) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com todo o resíduo ( $3.600 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de soja produzido (**C-S<sub>1/1</sub>**), o que resultou em vinte e cinco fileiras de soqueiras de colmos de soja e cinquenta e cinco sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

b) Semeadura direta no sentido transversal ao declive (em contorno) com metade do resíduo ( $1.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de soja produzido (**C-S<sub>1/2</sub>**), o que resultou em vinte e cinco fileiras de soqueiras de colmos de soja e cinquenta e cinco sulcos de semeadura transversais ao declive, por parcela;

c) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com todo o resíduo ( $3.600 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de soja produzido (**P-S<sub>1/1</sub>**), o que resultou em oito fileiras de soqueiras de colmos de soja e dezoito sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela;

d) Semeadura direta no sentido paralelo ao declive (morro abaixo) com metade do resíduo ( $1.800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) de soja produzido (**P-S<sub>1/2</sub>**), o que resultou em oito fileiras de soqueiras de colmos de soja e dezoito sulcos de semeadura paralelos ao declive, por parcela.



Figura 8 - Vista geral dos tratamentos referentes ao experimento 3, logo após a operação de semeadura mecanizada realizada sobre o resíduo cultural de soja. **a)** semeadura em contorno com 100% da dose de resíduo (C-S<sub>1/1</sub>); **b)** semeadura em contorno com 50% da dose de resíduo (C-S<sub>1/2</sub>); **c)** semeadura morro abaixo com 100% da dose de resíduo (P-S<sub>1/1</sub>); **d)** semeadura morro abaixo com 50% da dose de resíduo (P-S<sub>1/2</sub>).

## 5.10 REALIZAÇÃO DOS TESTES DE CHUVA SIMULADA

No experimento 1, realizado sobre o resíduo cultural do milho, o teste de chuva simulada ocorreu nos dias 28 e 29 de junho de 2010. No experimento 2, sobre o resíduo do trigo, o teste ocorreu nos dias 02 e 03 de dezembro do mesmo ano e, no experimento 3, sobre o resíduo de soja, o teste ocorreu nos dias 06 e 07 de maio de 2011. Como o simulador de chuvas cobria simultaneamente duas unidades experimentais e havia oito parcelas, foi necessária a realização de quatro chuvas simuladas por teste. Cada chuva teve duração de 153 minutos no experimento 1 e de 171 minutos nos experimentos 2 e 3. Isso ocorreu, pois, além dos 90 min de chuva para se atingir taxa constante de enxurrada, cada nível de fluxo extra tinha duração de 9 min. Devido à limitação da moto-bomba, era possível realizar a abertura simultânea dos fluxos extras de água na cabeceira das parcelas até o quinto nível de fluxo. A partir daí, era necessário fechar o registro de entrada de água em uma das parcelas para se poder aumentar a vazão e conseqüentemente o nível do fluxo na outra parcela.

## 5.11 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

Antes da realização dos experimentos, foram coletadas amostras deformadas de solo em cada parcela, nas profundidades de 0-2,5; 2,5-5,0; 5-10 e 10-20 cm, para fins de caracterização das mesmas (Tabela 1). Com essas amostras foram determinadas a granulometria, a argila dispersa em água e a densidade de partículas, conforme metodologia da EMBRAPA (1997); o teor de carbono orgânico do solo, pelo método descrito em Tedesco et al. (1995); e o índice DMP dos agregados estáveis em água, pelo método de Kemper & Chepil (1965). Nas mesmas profundidades, foram coletadas amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos para determinação da densidade aparente do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, conforme metodologia da EMBRAPA (1997).

## 5.12 DETERMINAÇÕES ANTERIORES À APLICAÇÃO DAS CHUVAS

### 5.12.1 Cobertura do solo por resíduos culturais

Antes e após as operações de semeadura que antecederam as chuvas simuladas nos três experimentos, foi determinada a cobertura do solo pelos resíduos culturais (Figura 9), por meio do método da corda marcada, descrito por Adams & Arkin (1977), sendo efetuadas duas determinações por parcela e obtido um valor médio de ambas.



Figura 9 - Determinação da cobertura do solo pelo método da corda marcada, anterior a operação de semeadura em uma das parcelas morro abaixo sobre resíduo de trigo.

Tabela 1- Caracterização do solo: granulometria, argila dispersa em água, densidade de partículas (Dp), densidade aparente do solo (Ds), porosidade total do solo (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), carbono orgânico do solo (C.org) e diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP)

Tratamento	Prof	Argila	Argila (H <sub>2</sub> O)	Silte	Areia total	Areia grossa	Areia fina	Dp	Ds	Pt	Ma	Mi	C.org	DMP
	cm	%			%			g cm <sup>-3</sup>		%			mm	
C <sub>-1/1</sub>	0-2,5	62	15	10	28	5	23	2,70	1,37	49	08	41	2,5	6,0
C <sub>-1/2</sub>		61	16	11	28	5	23	2,77	1,34	51	15	36	2,4	5,1
P <sub>-1/1</sub>		61	11	11	28	5	23	2,77	1,24	55	19	36	2,4	5,7
P <sub>-1/2</sub>		61	13	11	28	5	23	2,76	1,36	51	11	40	2,7	5,6
C <sub>-1/1</sub>	2,5-5	62	16	10	28	5	23	2,77	1,45	48	06	42	2,1	5,6
C <sub>-1/2</sub>		62	18	10	28	6	22	2,82	1,40	50	13	37	2,2	4,9
P <sub>-1/1</sub>		62	13	10	28	5	23	2,80	1,42	51	14	37	2,3	5,6
P <sub>-1/2</sub>		62	13	10	28	5	23	2,76	1,45	48	08	40	2,5	5,5
C <sub>-1/1</sub>	5-10	62	14	10	28	5	23	2,81	1,42	49	07	42	2,1	5,5
C <sub>-1/2</sub>		63	19	9	28	5	23	2,84	1,40	51	12	39	2,2	4,3
P <sub>-1/1</sub>		62	12	9	29	5	24	2,77	1,36	51	12	39	2,1	5,4
P <sub>-1/2</sub>		63	12	9	28	5	23	2,77	1,42	49	08	41	2,2	4,4
C <sub>-1/1</sub>	10-20	63	12	10	27	5	22	2,85	1,46	49	09	40	1,9	5,3
C <sub>-1/2</sub>		62	19	10	28	5	23	2,82	1,45	48	09	39	2,0	4,8
P <sub>-1/1</sub>		61	13	11	28	5	23	2,81	1,44	49	09	40	2,0	5,9
P <sub>-1/2</sub>		63	15	9	28	5	23	2,82	1,48	48	08	40	2,2	5,0

C<sub>1/1</sub>-Parcelas que receberam os tratamentos em contorno com a dose integral dos resíduos (milho, trigo e soja); C<sub>1/2</sub>- Parcelas que receberam os tratamentos em contorno com a metade da dose dos resíduos (milho, trigo e soja); P<sub>1/1</sub>- Parcelas que receberam os tratamentos morro abaixo com a dose integral dos resíduos (milho, trigo e soja); P<sub>1/2</sub>- Parcelas que receberam os tratamentos morro abaixo com a metade da dose dos resíduos (milho, trigo e soja). (Média dos pares de parcelas)

### 5.12.2 Teor de água no solo

Imediatamente antes do início das chuvas, nos três experimentos, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, em um ponto em cada parcela, com auxílio de um trado, para determinação da umidade volumétrica ( $U_v$ ) no solo antecedente à chuva. A  $U_v$  foi calculada por meio da multiplicação da umidade gravimétrica ( $U_g$ ) pela densidade aparente do solo ( $D_s$ ), seguindo a metodologia da EMBRAPA (1997).

## 5.13 DETERMINAÇÕES EFETUADAS, EM FUNÇÃO DAS CHUVAS SIMULADAS DE 90 MINUTOS

### 5.13.1 Taxa instantânea de enxurrada

Com o início da enxurrada, iniciou-se a medição da taxa instantânea de escoamento que era feita em intervalos de cinco minutos até o final dos 90 min de duração da chuva (Figura 10). Para isso, utilizou-se uma proveta graduada de 2.000 ml, a qual era colocada sob o fluxo, na extremidade do cano conectado à calha coletora, de onde saía a enxurrada. A duração da coleta variava conforme a vazão, anotando-se o volume e o tempo de coleta, com o intuito de verificar a estabilização da taxa de enxurrada até o final dos 90 min de chuva.



Figura 10 - Medição da taxa de enxurrada na chuva anterior aos fluxos extras.

### 5.13.2 Intensidade e volume real das chuvas

Para verificação da intensidade e volume real das chuvas simuladas aplicadas (Tabela 2), foram distribuídos estrategicamente 20 pluviômetros sobre a área coberta pela chuva simulada, com área de captação de  $53,85 \text{ cm}^2$  cada um. Ao final dos 90 min de chuva, fez-se a



leitura do volume de água dos pluviômetros, com auxílio de uma proveta graduada (ml). A intensidade real de chuva foi obtida pela seguinte fórmula:

$$i = 10 (V_m / A / t)$$

Onde:

$i$  = intensidade de chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$V_m$  = volume médio de água nos pluviômetros (mL)

$A$  = área de captação dos pluviômetros ( $\text{cm}^2$ )

$t$  = tempo de duração da chuva (h)

10 = fator de conversão de unidades

O volume total de enxurrada foi obtido pela multiplicação da intensidade da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ) pelo tempo de duração da mesma (h).

Tabela 2 - Intensidade e volume real das chuvas simuladas aplicadas nos tratamentos estudados, nos experimentos realizados sobre o resíduo cultural de milho, trigo e soja

Tratamento	Intensidade de chuva $\text{mm h}^{-1}$	Volume de chuva mm
Experimento 1, resíduo de milho		
C-M <sub>1/1</sub>	69	104
C-M <sub>1/2</sub>	67	101
P-M <sub>1/1</sub>	69	104
P-M <sub>1/2</sub>	67	101
Experimento 2, resíduo de trigo		
C-T <sub>1/1</sub>	71	107
C-T <sub>1/2</sub>	67	101
P-T <sub>1/1</sub>	69	104
P-T <sub>1/2</sub>	65	98
Experimento 3, resíduo de soja		
C-S <sub>1/1</sub>	70	105
C-S <sub>1/2</sub>	69	104
P-S <sub>1/1</sub>	68	102
P-S <sub>1/2</sub>	67	101

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

### 5.13.3 Taxa constante de enxurrada

A taxa constante de enxurrada foi obtida pela média das duas últimas leituras da chuva inicial, feita aos 85 e aos 90 min. Posteriormente, elas foram ajustadas para a intensidade de chuva de  $65 \text{ mm h}^{-1}$ , segundo a expressão:

$$q_{Caj} = q_{Creal} - (i_{real} - i_{plan})$$

Onde:

$q_{c_{aj}}$  = taxa constante de enxurrada ajustada ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$q_{c_{real}}$  = taxa constante de enxurrada real, observada no campo ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$i_{real}$  = intensidade de chuva real, observada no campo ( $\text{mm h}^{-1}$ )

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

## 5.14 DETERMINAÇÕES EFETUADAS, EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DOS FLUXOS EXTRAS DE ÁGUA

### 5.14.1 Taxa de enxurrada

Após os 90 min de chuva, sem interromper o funcionamento do simulador de chuvas, iniciou-se a adição dos fluxos extras de água na cabeceira das parcelas. Nesse momento, a medição da taxa de enxurrada passou a ser efetuada por meio de leituras no piezômetro do vertedor. Com base na taxa de enxurrada constante da chuva anterior aos fluxos extras, sabia-se, previamente, quais deveriam ser as alturas no vertedor para cada um dos níveis de fluxo. Com isso, os registros que regulavam os fluxos extras (um para cada parcela) eram abertos até a enxurrada atingir a altura desejada no vertedor. Cada nível de fluxo tinha duração de 9 min, sendo as leituras realizadas aos 3, 6 e 9 min. Ao final da terceira leitura, regulavam-se novamente os registros para atingir o nível seguinte de fluxo. A taxa de enxurrada de cada nível foi calculada por uma média das três leituras.

### 5.14.2 Concentração de sedimentos

Imediatamente após a leitura da taxa de enxurrada no vertedor, nos intervalos de três minutos, colocava-se sob o fluxo um pote plástico com capacidade de 0,8 L, mantido ali o tempo necessário para enchê-lo, objetivando a coleta de enxurrada para determinação da concentração de sedimentos na mesma. A mesma foi calculada dividindo-se a massa de sedimentos contida no pote (após secagem em estufa) pela massa de enxurrada coletada. A concentração de sedimentos na enxurrada, em cada nível, foi calculada por uma média das três coletas feitas nos 9 min.

### 5.14.3 Velocidade de enxurrada

Aos 5 min de duração de cada nível de fluxo extra fez-se a medição da velocidade da enxurrada, com uso de um corante a base de azul de metileno a 2%. Para isso, foi demarcado

nas parcelas um segmento de 6 m (2,5 m acima e 2,5 m abaixo das extremidades, no centro das parcelas). O corante era jogado na parte superior do segmento e era contado o tempo para que o mesmo atingisse a parte inferior, conforme Bertol (1995).

#### 5.14.4 Taxa média de erosão

A taxa média de erosão ( $D_p$ ) foi calculada multiplicando-se a concentração de sedimentos no fluxo ( $\text{kg L}^{-1}$ ) pela taxa de enxurrada ( $\text{L h}^{-1}$ ), sendo o resultado dividido pela área total da parcela ( $38,5 \text{ m}^2$ ). O valor correspondente para cada nível de fluxo extra foi obtido por uma média das três coletas feitas nos 9 min.

#### 5.14.5 Ajuste das perdas de solo para cada nível de fluxo extra

Obtidos os valores da taxa média de erosão, as perdas totais de solo, para cada nível de fluxo extra, foram ajustadas para a intensidade planejada de  $65 \text{ mm h}^{-1}$ , conforme Cogo (1981) e descrito a seguir:

$$PS_a = PS_o (i_p / i_r)^2$$

Onde:

$PS_a$  = perda de solo ajustada ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

$PS_o$  = perda de solo observada ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

$i_p$  = intensidade de chuva planejada ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$i_r$  = intensidade de chuva real ( $\text{mm h}^{-1}$ )

Ainda, as perdas de solo foram ajustadas para a declividade média das parcelas experimentais. Este ajuste foi feito multiplicando-se a perda de solo ajustada para  $65 \text{ mm h}^{-1}$  por um valor obtido da divisão do fator S do declive médio das parcelas pelo fator S do declive de cada parcela, obtido de acordo com o procedimento recomendado por Wischmeier & Smith (1978) e descrito a seguir:

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

Onde  $\theta$  é o ângulo do declive.

#### 5.14.6 Erosividade da chuva durante os níveis de fluxo extra

A erosividade da chuva ( $EI_{30}$ ) para cada nível de fluxo extra (9 min), para o bico aspersor VEEJET 80/100, foi calculada conforme MEYER (1958), da seguinte forma:

$$EI_{30} = 0,2083 Q I \text{ (MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)}$$

Onde:

Q = quantidade de chuva aplicada, em mm

I = intensidade da chuva aplicada, em mm h<sup>-1</sup>

#### 5.14.7 Perda de solo por unidade de EI<sub>30</sub>

As perdas totais de solo ajustadas, ocorridas durante cada nível de fluxo extra, foram divididas pela erosividade da chuva no período, resultando na perda total de solo por unidade de EI<sub>30</sub>.

#### 5.14.8 Taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental

A taxa de descarga no ponto médio da parcela ( $q_m$ ) foi obtida conforme Foster et al. (1982), sendo calculada da seguinte forma:

$$q_m = (q_i + q_a) / 2$$

Onde:

$q_i$ : taxa de descarga na extremidade inferior da parcela (taxa de enxurrada medida no vertedor)

$q_a$ : taxa de descarga adicionada na extremidade superior da parcela. A ( $q_a$ ) foi obtida pela diferença entre a taxa de descarga da extremidade inferior da parcela ( $q_i$ ) e a taxa constante de enxurrada ajustada da chuva inicial ( $q_c$ ).

#### 5.14.9 Comprimento equivalente de declive

O comprimento de declive equivalente aos fluxos extras de água ( $L_e$ ) foi computado conforme Cogo (1981). Assim, o comprimento do declive total para cada nível de fluxo extra adicionado, foi o comprimento necessário para gerar uma taxa de fluxo igual à taxa de fluxo adicionada, mais 11 m que é o comprimento da parcela, de acordo com a seguinte equação:

$$L_e = (q_a/q_c) (L) + L$$

Onde:

$q_a$ : fluxo extra de água adicionada na extremidade superior da parcela (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)

$q_c$ : taxa de excesso da chuva equivalente à taxa constante de enxurrada da chuva inicial (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)

L: comprimento da parcela (11 m)

#### 5.14.10 Tensão crítica de cisalhamento

A tensão crítica de cisalhamento da enxurrada ( $\tau_c$ ) foi computada seguindo os procedimentos matemáticos descritos a seguir e encontrados em Bertol (1995).

$$\tau_c = (\gamma Y_c s)$$

Onde:

$\tau_c$ : tensão crítica de cisalhamento do fluxo superficial ( $\text{N m}^{-2}$ )

$Y_c$ : profundidade do fluxo superficial no comprimento crítico de declive (m)

$\gamma$ : peso específico da água ( $9.807 \text{ N m}^{-3}$ )

$s$ : seno do ângulo do declive

$$Y_c = q_m / V$$

Onde:

$q_m$ : taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental, no comprimento crítico de declive ( $\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

$V$ : velocidade da enxurrada no comprimento crítico ( $\text{m s}^{-1}$ )

#### 5.14.11 Regressões

Com esses dados, foram estabelecidas as relações da taxa média de erosão ( $D_p$ ); concentração de sedimentos na enxurrada ( $C$ ); e velocidade da enxurrada ( $V$ ) com a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), segundo Foster et al. (1982). Análises de regressão linear e de regressão não linear, quando pertinente, foram utilizadas para interpretar os dados.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Cobertura do solo por resíduos culturais (CR)

A CR foi influenciada pelo tipo e quantidade de resíduos e pela operação de semeadura (Tabela 3). Os resíduos de milho resultaram em maior CR, em razão das maiores quantidades de massa vegetal produzidas. Nos cultivos do milho, trigo e soja, a metade da dose de resíduos reduziu, respectivamente, 19, 13 e 13% a CR, quando comparados com a dose de 100% de resíduos produzidos.

Após a semeadura mecanizada, houve redução na CR de 7, 35 e 23%, quando realizada sobre os resíduos de milho, trigo e soja, respectivamente, considerando a média das doses. No caso do milho, a pequena redução ocorreu pelo fato de que a quantidade do resíduo produzido foi elevada e, a semeadora, equipada apenas com discos de corte, não foi capaz de mobilizar o solo na linha de semeadura com grande intensidade. Já sobre o resíduo de trigo, a semeadora estava equipada também com hastes sulcadoras e a quantidade do resíduo era menor em relação ao milho. Pelo fato de as hastes sulcadoras possuírem a característica de mobilizar o solo com maior intensidade onde atuam, quando comparada com o uso apenas dos discos de corte, facilitou a incorporação de maior quantidade do resíduo. Sobre o resíduo da soja, foi utilizada semeadora semelhante à utilizada para o milho. No entanto, a cobertura final da superfície foi menor, pois o resíduo da soja estava em menor quantidade e suas peças (colmos e folhas) eram menos espessas e menos resistentes a ação de corte do disco, do que o resíduo de milho, o que resultou em maior incorporação. Cabe lembrar, que a utilização de semeadoras com discos de corte são comuns na região para a semeadura de culturas de inverno, sendo as semeadoras equipadas com hastes sulcadoras utilizadas para culturas de verão. Isso justifica a utilização de diferentes semeadoras nos experimentos. As quantidades de resíduos produzidos pelas culturas encontram-se descritas no item 3, em material e métodos.

Os resíduos culturais, mesmo nas menores quantidades (metade da dose), resultaram em uma cobertura de solo satisfatória antes da operação de semeadura (Tabela 3). No entanto,

após a semeadura mecanizada, houve uma redução considerável na cobertura, principalmente quando efetuada com hastes sulcadoras. Com isso, torna-se imprescindível o manejo das culturas almejando elevada produção de resíduos vegetais, para que, após a semeadura das culturas, ainda haja boa proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva.

Tabela 3 - Cobertura do solo (%) pelos resíduos culturais de milho, trigo e soja, nos diferentes tratamentos, antes e após a operação de semeadura mecanizada antecedente à chuva e após chuva simulada com adição dos fluxos extras de água.

Tratamento	Antes da semeadura	Após a semeadura	Após os fluxos extras
Experimento 1, resíduo de milho			
C-M <sub>1/1</sub>	94	90	71
C-M <sub>1/2</sub>	77	68	52
P-M <sub>1/1</sub>	95	88	75
P-M <sub>1/2</sub>	75	69	47
Experimento 2, resíduo de trigo			
C-T <sub>1/1</sub>	85	51	48
C-T <sub>1/2</sub>	70	32	28
P-T <sub>1/1</sub>	83	50	40
P-T <sub>1/2</sub>	71	38	29
Experimento 3, resíduo de soja			
C-S <sub>1/1</sub>	90	68	44
C-S <sub>1/2</sub>	76	53	28
P-S <sub>1/1</sub>	89	70	39
P-S <sub>1/2</sub>	78	51	29

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

## 6.2 Teor de água no solo antecedente às chuvas

O teor de água no solo antecedente às chuvas, expresso pela umidade volumétrica, pouco variou entre os tratamentos dentro de cada experimento, sendo ligeiramente menor na camada de solo de 0-0,1 m, em comparação com a camada inferior de 0,1-0,2 m (Tabela 4). Nos diferentes experimentos, a  $U_v$  foi menor antecedendo o teste sobre o resíduo de soja, pelo fato de ter ocorrido um volume menor de precipitação natural nesse período. A saturação dos poros do solo com água, na camada amostrada de 0-0,2 m, a qual foi obtida pela divisão da umidade volumétrica do solo pela porosidade total do solo, variou de 77 a 86%. Isso mostra que, no geral, o solo possuía teores elevados de água antes dos testes de chuva, fato que contribuiu para que os dados de taxa constante de enxurrada ao final da chuva de 90 min fossem confiáveis, ou seja, semelhante a uma condição de solo saturado, o que foi imprescindível para o cálculo do comprimento crítico de declive.

Tabela 4 - Umidade volumétrica no solo ( $U_v$ ) nas profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m e saturação dos poros por água (SP), na camada de 0-0,2 m de solo, antecedente às chuvas simuladas aplicadas nos experimentos realizados sobre os resíduos de milho, trigo e soja, nos tratamentos estudados

Tratamento	$U_v$ (%)		SP (%)
	0-0,1 m	0,1-0,2 m	0-0,2 m
Experimento 1, resíduo de milho			
C-M <sub>1/1</sub>	41	43	86
C-M <sub>1/2</sub>	38	42	81
P-M <sub>1/1</sub>	41	42	83
P-M <sub>1/2</sub>	37	43	83
Média	39	43	83
Experimento 2, resíduo de trigo			
C-T <sub>1/1</sub>	39	40	79
C-T <sub>1/2</sub>	41	40	83
P-T <sub>1/1</sub>	43	41	88
P-T <sub>1/2</sub>	39	41	80
Média	41	41	82
Experimento 3, resíduo de soja			
C-S <sub>1/1</sub>	38	41	79
C-S <sub>1/2</sub>	36	40	75
P-S <sub>1/1</sub>	36	40	78
P-S <sub>1/2</sub>	36	39	77

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

### 6.3 TAXA CONSTANTE DE ENXURRADA ( $q_c$ ) DA CHUVA DE 90 min

A  $q_c$  teve comportamento diferenciado nos experimentos. No teste de chuva sobre o resíduo de milho, os valores de  $q_c$  variaram de 34 a 42 mm h<sup>-1</sup>, sendo mais influenciados pela dose do resíduo do que pela direção de semeadura (Tabela 5). A menor dose e a semeadura em contorno ao declive reduziram em 15% e 5% a  $q_c$  em relação à maior dose e a semeadura morro abaixo, respectivamente. Isto ocorreu devido a maior mobilização do solo na linha de semeadura na menor dose, ocasionada pelo maior contato do disco da semeadora com o solo, o que melhorou as condições superficiais do solo para a infiltração de água. Com isso, a  $q_c$  foi dependente da interação dos efeitos do equipamento de corte utilizado na semeadora e da quantidade de resíduo na superfície, pois, o uso dos discos foi menos eficiente em mobilizar o solo quando a dose do resíduo de milho foi maior. Além disso, os discos produziram sulcos rasos, diminuindo o efeito da direção da semeadura em contorno em aumentar a infiltração de água no solo, quando comparada com a semeadura morro abaixo.



Tabela 5 - Taxa constante de enxurrada ajustada para 65 mm h<sup>-1</sup> (q<sub>c</sub>), nos diferentes tratamentos, sob chuva simulada de 90 min de duração, em parcelas com declividade média de 0,144 m m<sup>-1</sup> no teste de chuva realizado sobre os resíduos de milho, trigo e soja

Tratamento	q <sub>c</sub> mm h <sup>-1</sup>
Experimento 1, resíduo de milho	
C-M <sub>1/1</sub>	39,2
C-M <sub>1/2</sub>	34,3
P-M <sub>1/1</sub>	41,8
P-M <sub>1/2</sub>	35,0
Experimento 2, resíduos de trigo	
C-T <sub>1/1</sub>	28,2
C-T <sub>1/2</sub>	32,0
P-T <sub>1/1</sub>	32,1
P-T <sub>1/2</sub>	33,8
Experimento 3, resíduos de soja	
C-S <sub>1/1</sub>	35,2
C-S <sub>1/2</sub>	35,8
P-S <sub>1/1</sub>	35,2
P-S <sub>1/2</sub>	34,8

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

Sobre o resíduo de trigo, a q<sub>c</sub> variou de 28 a 34 mm h<sup>-1</sup>, sendo que a maior dose e a semeadura em contorno ao declive reduziram em 9% e 9% a q<sub>c</sub>, quando comparadas com a menor dose e a semeadura morro abaixo, respectivamente. Nestes casos, o uso das hastes sulcadoras acopladas à semeadora mobilizaram com maior intensidade o solo na linha de semeadura, potencializando o real efeito da dose do resíduo, além de aumentar o efeito da direção de semeadura. Na metade da dose, devido à cobertura do solo ser baixa, possivelmente ocorreu maior selamento superficial provocado pelo impacto das gotas de chuva, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial, em relação à dose integral do resíduo.

No teste de chuva realizado sobre o resíduo da soja, não houve influência da dose e da direção de semeadura nos valores de q<sub>c</sub>, os quais variaram de 35 a 36 mm h<sup>-1</sup>. O uso apenas dos discos não surtiram o efeito da direção de semeadura e, provavelmente, a degradação dos atributos físicos do solo pelos experimentos anteriores, diminuíram o efeito da dose do resíduo no regime do escoamento superficial.

Analisando conjuntamente os experimentos, os valores de q<sub>c</sub> das chuvas realizadas sobre os resíduos de milho e de soja foram, de modo geral, superiores aos valores obtidos sobre o resíduo de trigo, sendo que o maior valor de q<sub>c</sub> no teste do trigo foi igual ao menor valor de q<sub>c</sub> dos testes do milho e da soja. Isso pode ser atribuído ao efeito do implemento

utilizado (Figura 11). Em trabalho de Amaral (2010), comparando semeadora apenas com discos e semeadora com discos e hastes, em semeadura direta, concluiu que a semeadora com as hastes favoreceu a infiltração de água no solo e controlou melhor a enxurrada do que a semeadora só com discos.

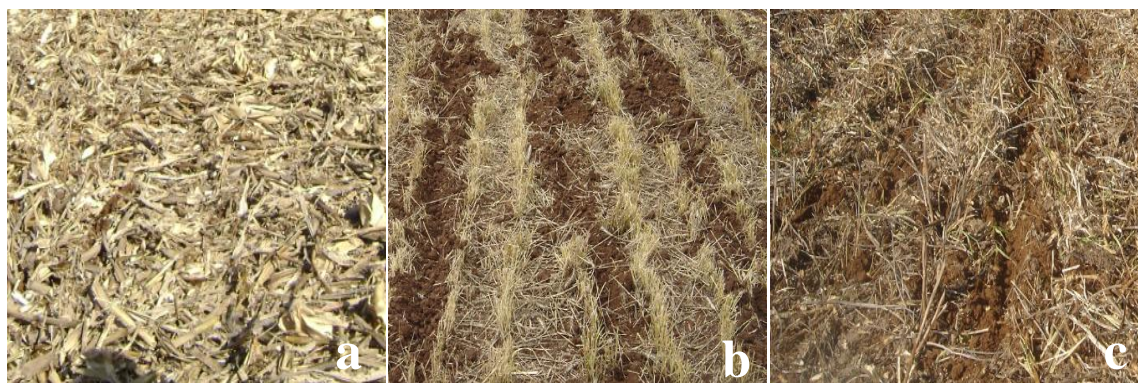


Figura 11 - Detalhe da mobilização do solo na linha de semeadura. **a)** uso de semeadora equipada com discos de corte na dose integral do resíduo de milho; **b)** uso de semeadora equipada com discos de corte e hastes sulcadoras na dose integral do resíduo de trigo; **c)** uso de semeadora equipada com discos de corte na dose integral do resíduo de soja.

#### 6.4 NÍVEIS DE FLUXO EXTRA DE ÁGUA ADICIONADOS NAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

Os níveis de fluxo extra de água adicionados na extremidade superior das parcelas, nos três experimentos, são mostrados na tabela 6. Os valores foram calculados pela diferença entre a taxa de descarga após a adição do fluxo (medida no vertedor ao final da parcela) e a taxa constante de enxurrada da chuva inicial de 90 min. Antes de adicionar os níveis, em tempo próximo aos 90 min de duração da chuva inicial, quando o solo já se encontrava sob condição de alagamento (taxa constante de fluxo), calculou-se a taxa de enxurrada nessa condição, ou seja, de equilíbrio. Em seguida, tendo-se em mãos uma planilha contendo os valores de vazão do vertedor, previamente conhecidos, sabia-se quais deveriam ser as alturas que deveriam ser atingidas no mesmo, para cada nível planejado. Como descrito em material e métodos, os fluxos planejados foram de 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5 e 3,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1} \times 10^{-3}$  no experimento 1 e de 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5, 2,2 e 3,0  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1} \times 10^{-3}$  nos experimentos 2 e 3.

Ao se analisar os dados dos experimentos, dentro de cada nível, os fluxos adicionados apresentaram pequena variação entre tratamentos (Figura 12). Além disso, houve satisfatória correspondência entre os dados dos níveis planejados e os dos níveis reais aplicados a campo. Em trabalhos para estudar comprimento crítico de declive realizados por Bertol (1995), Morais (1999) e Amaral (2010), a abertura dos registros na tubulação para adicionar os fluxos, foi controlada também manualmente e com auxílio de manômetros e a taxa de

descarga foi medida em baldes graduados. Segundo os autores, a metodologia empregada resultou em grande variação de fluxos entre tratamentos dentro de cada nível, devido à pequena sensibilidade dos manômetros no controle da vazão, prejudicando as comparações. No presente trabalho, no entanto, a minimização desse erro experimental foi possível devido à utilização da câmara com vertedor, ligada à calha coletora de enxurrada da parcela por meio de cano de PVC com diâmetro maior do que o utilizado pelos autores recém citados. Pequenas variações nos fluxos entre tratamentos ocorreram nos últimos níveis, devido às diferenças de altura da linha de tubos usados para adicionar água na cabeceira das parcelas e às diferenças de perda de carga devido às diferenças de comprimento da linha de tubos entre a motobomba e as parcelas. Isso ocorreu, pois, a partir do quinto nível de fluxo extra, os registros foram abertos ao máximo, simultaneamente nos pares de parcelas, ou, em apenas uma delas, conforme descrito em material e métodos.

## 6.5 COMPRIMENTOS DE DECLIVE SIMULADOS

Os comprimentos de declive simulados ( $L_e$ ), equivalentes aos fluxos extras de água adicionados, foram calculados por meio da equação descrita no item 3, em material e métodos, sendo diretamente proporcional ao fluxo de água adicionado na cabeceira das parcelas ( $q_a$ ) e inversamente proporcional a taxa constante de enxurrada da chuva inicial ( $q_c$ ). De forma mais clara, para a determinação do  $L_e$ , tendo como base a taxa constante de enxurrada da chuva inicial, o aumento da taxa global de enxurrada, pela adição do fluxo extra, representou o aumento do comprimento de rampa em relação ao comprimento da parcela.

Os comprimentos calculados para os diferentes níveis de fluxo extra, durante a realização dos experimentos 1, 2 e 3, nos tratamentos estudados, são mostrados na tabela 6. Na presente pesquisa, houve êxito na obtenção de uma ampla faixa de comprimentos de declive simulados, desde relativamente curtos até considerados longos, os quais variaram de 45 a 302 m no experimento 1 (sobre o resíduo de milho), de 44 a 395 no experimento 2 (sobre o resíduo de trigo) e de 36 a 363 m no experimento 3 (sobre o resíduo de soja). As diferenças entre os experimentos, em cada nível, devem-se essencialmente as variações nas taxas constantes de enxurrada.

Tabela 6 - Taxa constante de enxurrada da chuva inicial -  $q_c$  ( $m^3 s^{-1} m^{-1} 10^{-3}$ ); fluxo extra de água adicionada na extremidade superior da parcela -  $q_a$  ( $m^3 s^{-1} m^{-1} 10^{-3}$ ) e comprimento equivalente de declive simulado -  $L_e$  (m), nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja

Tratamento	$q_c$	Nível de fluxo extra de água adicionado nas parcelas													
		1		2		3		4		5		6		7	
		$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$	$q_a$	$L_e$
Experimento 1, resíduo de milho															
C-M <sub>1/1</sub>	0,120	0,38	45	0,61	67	0,89	93	1,17	119	1,57	155	3,05	291	-	-
C-M <sub>1/2</sub>	0,105	0,32	45	0,61	75	0,81	97	1,09	126	1,37	155	2,69	294	-	-
P-M <sub>1/1</sub>	0,128	0,41	46	0,77	78	0,93	91	1,31	124	1,66	154	2,91	262	-	-
P-M <sub>1/2</sub>	0,107	0,37	49	0,73	86	0,95	109	1,24	138	1,64	180	2,83	302	-	-
Experimento 2, resíduo de trigo															
C-T <sub>1/1</sub>	0,086	0,39	61	0,58	85	0,80	114	1,06	147	1,50	202	2,19	290	2,81	370
C-T <sub>1/2</sub>	0,098	0,35	51	0,64	83	0,86	107	1,10	135	1,71	203	2,29	269	3,12	362
P-T <sub>1/1</sub>	0,098	0,47	64	0,64	82	0,91	113	1,13	138	1,61	192	2,42	283	3,43	395
P-T <sub>1/2</sub>	0,103	0,31	44	0,56	70	0,80	96	1,04	122	1,24	143	1,96	220	2,83	313
Experimento 3, resíduo de soja															
C-T <sub>1/1</sub>	0,108	0,31	43	0,58	70	0,97	110	1,23	137	1,61	176	2,46	263	3,44	363
C-T <sub>1/2</sub>	0,109	0,26	37	0,54	66	0,87	99	1,14	126	1,63	175	1,99	211	3,10	323
P-T <sub>1/1</sub>	0,108	0,36	47	0,64	76	0,94	107	1,27	141	1,79	194	2,08	224	3,09	327
P-T <sub>1/2</sub>	0,106	0,24	36	0,62	75	0,89	103	1,16	131	1,91	208	2,41	261	3,13	334

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

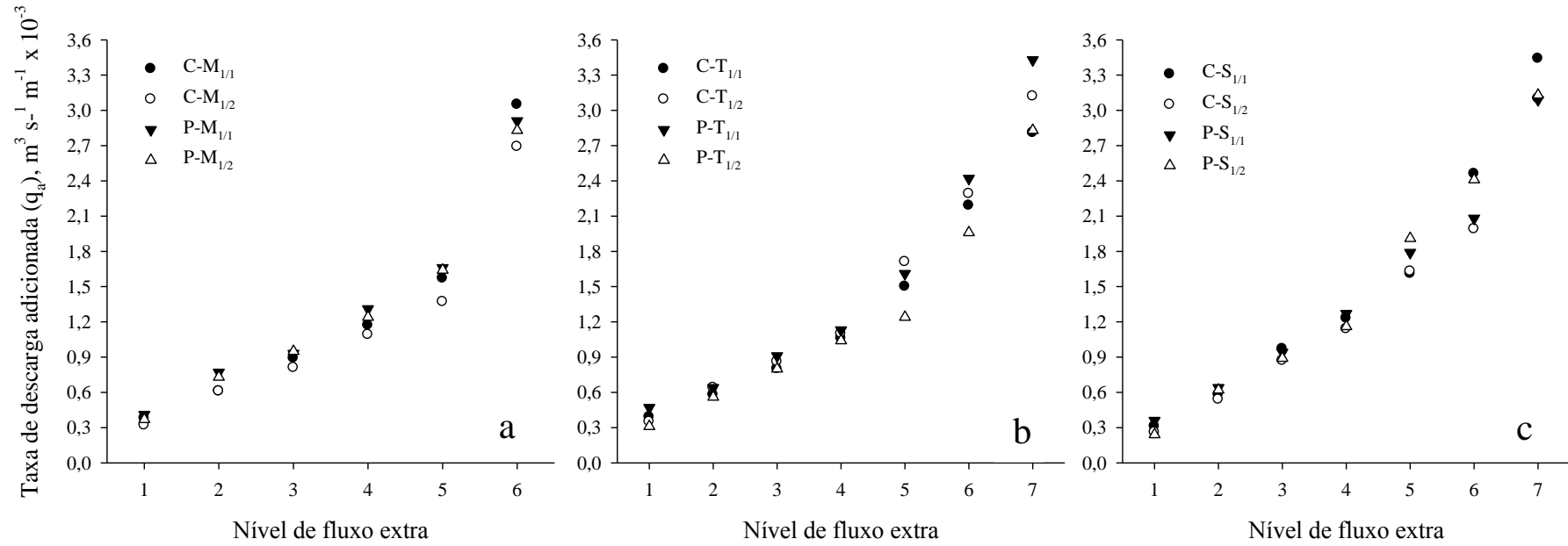


Figura 12 - Taxa de descarga adicionada na extremidade superior das parcelas e correspondente nível de fluxo extra, nos diferentes tratamentos. **a)** experimento 1, resíduo de milho; **b)** experimento 2, resíduo de trigo; **c)** experimento 3, resíduo de soja.

## 6.6 OBSERVAÇÃO VISUAL DA FALHA DOS RESÍDUOS CULTURAIS

Através de observações visuais a campo, no momento da aplicação das chuvas simuladas com adição de fluxos extras de água nas parcelas, tentou-se identificar a ocorrência da falha dos resíduos culturais. Com base no trabalho de Foster et al. (1982), procurou-se, em cada nível de fluxo extra, observar se o resíduo era removido nas formas de peça por peça ou em massa, ou se o solo era sulcado por baixo do resíduo, sem removê-lo. Além da observação no local, fotos digitais foram tiradas para auxiliar na interpretação dos resultados.

Experimento 1, realizado com o resíduo de milho

A falha do resíduo de milho pela observação visual a campo, durante a adição dos fluxos extras de água, foi identificada em todos os tratamentos. No C-M<sub>1/1</sub>, ocorreu no último (sexto) nível, quando o resíduo foi deslocado em massa por toda a extensão da parcela (11 m), nos locais onde o fluxo se concentrou. A remoção iniciou na parte superior da parcela e, à medida que avançou em direção a parte inferior, parte do resíduo ficou ancorado nas soqueiras remanescentes do milho dispostas em contorno ao declive, mudando a trajetória de deslocamento do fluxo concentrado. Nesse momento, foi observada uma mudança na coloração da água de escoamento, passando de clara para escura e turva, indicando um possível aumento na concentração de sedimentos na enxurrada.

Nos tratamentos C-M<sub>1/2</sub> e P-M<sub>1/1</sub>, a primeira observação da falha ocorreu no quinto nível de fluxo. No C-M<sub>1/2</sub>, o resíduo, mais leve e solto, foi deslocado gradativamente, peça por peça, em vários locais na parcela, tendo sido ancorados em locais situados logo abaixo, em soqueiras do milho e em peças maiores do resíduo, enquanto que no P-M<sub>1/1</sub>, o deslocamento ocorreu em massa em curtas distâncias (menores que um metro), preferencialmente por entre as soqueiras, as quais estavam dispostas morro abaixo. No sexto nível de fluxo, a remoção ocorreu em massa por toda a extensão da parcela, nos dois tratamentos.

No tratamento P-M<sub>1/2</sub>, a falha ocorreu no quarto nível de fluxo, com remoção do resíduo em massa em curtas distâncias (menores que um metro). No quinto nível, o deslocamento foi em distâncias maiores que um metro e, no sexto nível, houve a remoção ao longo de toda a extensão da parcela, com carregamento de grande parte do resíduo que, após ter sido deslocado pela adição dos fluxos anteriores, estava amontoado em locais inferiores na parcela.

Ao final da série de fluxos extras, de modo geral, houve a formação de sulcos pouco profundos, pois, aparentemente, a superfície do solo estava compactada e a mobilização ocasionada pela semeadora foi pequena, não sendo suficiente para que a superfície do solo se tornasse suscetível ao sulcamento. Representativa área da superfície das parcelas ficou exposta, sem proteção pelo resíduo. Nos tratamentos morro abaixo, o resíduo foi deslocado principalmente nas entrelinhas das soqueiras do milho, enquanto que, nos tratamentos em contorno, este ocorreu nos locais onde ocorreram falhas nas linhas de plantas. As falhas foram influenciadas pelo efeito do rodado do trator que, devido a sua passagem, destruiu muitas soqueiras de plantas de milho durante a operação de semeadura, realizada antecedente as chuvas. O resíduo que permaneceu ancorado aprisionou parte dos sedimentos transportados pelo fluxo, principalmente nos tratamentos em que a operação de semeadura foi realizada em contorno ao declive.

#### Experimento 2, realizado com o resíduo de trigo

No experimento realizado sobre o resíduo de trigo, a identificação visual do ponto de falha, no campo, não ocorreu com nitidez para todos os tratamentos. Nos morro abaixo (P-T<sub>1/1</sub> e P-T<sub>1/2</sub>), nos primeiros níveis de fluxo extra, houve indício da falha, mas sem identificação clara do ponto de ocorrência. O escoamento concentrou-se preferencialmente nas linhas de atuação da semeadora, dispostas no sentido do declive. Aos poucos, e de forma pouco perceptível a olho, peças do resíduo solto que estavam próximas a área mobilizada foram removidas, peça por peça, sendo esse processo melhor visualizado nos níveis mais altos de fluxo. Foi observada remoção do solo mobilizado pela semeadora de dentro dos sulcos para fora da área das parcelas, principalmente no tratamento com metade da dose. Na medida em que aumentou a enxurrada, pela adição de níveis maiores de fluxo, a profundidade dos sulcos aumentou, sendo que, ao final do maior nível, a maior parte do solo mobilizado pelos discos e hastes da semeadora havia sido perdida pela erosão.

Nos tratamentos em contorno ao declive (C-T<sub>1/1</sub> e C-T<sub>1/2</sub>), parte do resíduo solto foi deslocado, peça por peça, nas entrelinhas das soqueiras de colmos do trigo (espaçadas em 0,2 m), sendo as peças ancoradas na entrelinha imediatamente abaixo, nas soqueiras da cultura. A remoção, neste caso, foi aparente nos últimos níveis de fluxo extra. Durante os fluxos, o grande número de colmos de trigo e a rugosidade orientada criada pela operação de semeadura, ambos dispostos contra o sentido do declive, formaram pequenos patamares na superfície do terreno, influenciando a lâmina de escoamento de uma linha de semeadura para

outra, sendo que, a passagem do fluxo de um patamar acima para um patamar abaixo ocorria por entre os colmos de trigo, com turbulência. Nos maiores fluxos, a partir do nível quatro, o escoamento começou a se concentrar em algumas posições nas parcelas, nos locais onde houve rompimento dos pequenos diques formados pelo preparo (semeadora) e pelos resíduos amontoados.

Ao final do teste, nos tratamentos morro abaixo, formaram-se sulcos muito profundos, até a base de atuação das hastes sulcadoras, enquanto que nos tratamentos em contorno, os sulcos formados eram rasos, ocasionados pelo rompimento dos diques formados pela ação da semeadora. Nos tratamentos P-T<sub>1/1</sub> e P-T<sub>1/2</sub>, o resíduo foi removido das parcelas principalmente nas áreas dos sulcos, com pequena remoção nas áreas dos entre sulcos, enquanto que nos tratamentos C-T<sub>1/1</sub> e C-T<sub>1/2</sub>, o resíduo foi pouco removido das parcelas.

Experimento 3, realizado com o resíduo de soja

No tratamento P-S<sub>1/2</sub>, no primeiro nível de fluxo extra, algumas peças do resíduo, mais leves e soltas, foram deslocadas. O escoamento ocorreu preferencialmente em sulcos, nas linhas onde atuaram os discos da semeadora. Em função do aumento da profundidade do fluxo, da pequena profundidade dos sulcos e da baixa quantidade de resíduos, a partir do segundo nível de fluxo, a enxurrada transbordou da área dos sulcos para a área dos entre sulcos. Como a quantidade do resíduo era pequena, a remoção ocorreu na forma de peça por peça. A coloração da água de escoamento era escura e turva.

No tratamento P-S<sub>1/1</sub>, no terceiro nível de fluxo, houve sulcamento e remoção de solo das linhas de semeadura, na parte inferior das parcelas (próxima a calha coletora de enxurrada). Houve remoção do resíduo da área dos sulcos para fora da área. A partir do quinto nível, o fluxo em sulcos estendeu-se por toda a extensão da parcela (11 m), removendo o resíduo em massa.

No tratamento C-S<sub>1/1</sub>, observou-se a falha do resíduo de soja no sexto nível, o qual flutuou e foi removido em massa na extensão total das parcelas. O processo ocorreu de forma semelhante à semeadura em contorno sobre o resíduo de milho na dose de 100% (C-M<sub>1/1</sub>), do experimento 1. A falha ocorreu da parte superior em direção a inferior, sendo que, o resíduo deslocado e ancorado nas soqueiras em contorno, direcionou o fluxo para onde não havia resíduo ancorado. Com isso, a falha ao longo do declive da parcela ocorreu ao longo de um caminho tortuoso.



No C-S<sub>1/2</sub>, no terceiro nível, houve remoção do resíduo, nas entrelinhas das soqueiras e por entre os colmos de soja, sendo que, a partir do quinto nível, a remoção foi por toda a extensão da parcela. No último nível de fluxo, a lâmina de escoamento removeu parte do resíduo entre os sulcos.

Ao final dos testes, nos tratamentos morro abaixo, formaram-se sulcos profundos, embora menores do que os sulcos formados no experimento 2 (trigo), enquanto que, nos tratamentos em contorno ao declive, houve a formação de sulcos pouco profundos, pelos locais onde ocorreu a remoção do resíduo. No entanto, em todos os tratamentos, houve expressiva redução da cobertura do solo, deixando grande área das parcelas exposta (Tabela tal).

#### Síntese a respeito da falha visual dos resíduos

A observação visual da falha dos resíduos foi de grande valia para a interpretação do ponto de falha obtido pelos indicadores teóricos de erosão, os quais foram desenvolvidos por Foster et al. (1982). No entanto, em alguns tratamentos, principalmente nas menores quantidades de resíduos, houve dificuldade na detecção visual da falha. Em muitos casos, a conclusão definitiva foi conseguida após verificar as fotografias obtidas digitalmente. Nos tratamentos com a menor dose do resíduo, nos experimentos 2 e 3, onde a produção total de massa seca foi menor em relação ao experimento 1, a remoção do resíduo na forma de peça por peça e, no caso dos tratamentos morro abaixo, a remoção de solo nos sulcos, ocorreu nos primeiros níveis de fluxo, sendo essa remoção de forma gradual e mais aparente nos últimos níveis de fluxo extra, onde já havia ocorrido a falha. Chama-se atenção a esse fato, pois, em situações de lavouras, a falha visual, detectada após um evento de chuva, e não durante o evento, poderia sugerir a ocorrência de comprimentos de rampa maiores do que o comprimento real da falha, onde o solo começou a ser sulcado e os resíduos começaram a ser transportados.

Além disso, nas lavouras, a falha dos resíduos poderá ser subjetiva para a escolha do comprimento crítico de declive, se a mesma ocorrer em eventos de chuvas naturais pouco erosivas e em solos não alagados. Nesse caso, a distância no terreno para a enxurrada adquirir energia suficiente para a remoção dos resíduos e sulcamento do solo será maior e, portanto, superestimada, em relação a falha ocorrida em condição de solo alagado sob chuva de alta erosividade. Também existe o risco de o solo ser sulcado por baixo do resíduo, sem removê-lo. Com base nisto, a detecção do ponto de falha, por meio de critérios científicos e sob

condições controladas, torna-se essencial para o estabelecimento, com maior segurança, de comprimentos críticos de declive, nos quais, a partir dos mesmos, os resíduos são menos eficientes em proteger o solo contra a erosão hídrica.

## 6.7 RELAÇÕES COM BASE EM TEORIA DE EROSÃO

### 6.7.1 Relação taxa de erosão ( $D_p$ ) x taxa de descarga ( $q_m$ )

As relações entre  $D_p$  e  $q_m$ , referentes aos experimentos 1, 2 e 3, constam nas figuras 13, 14 e 15. Antes de discutir os resultados, é necessário fazer algumas considerações a respeito de como os dados foram analisados. A taxa de erosão aqui referida trata-se apenas da perda de solo ocorrida no último segmento do declive simulado, correspondente ao comprimento da parcela (11 m). Com base na teoria de erosão de Foster et al. (1982), foram realizadas regressões lineares entre as variáveis  $D_p$  e  $q_m$ , utilizando, para isso, as repetições de tratamentos, embora, nas figuras, constem os valores médios das repetições. Das equações lineares, foram obtidos dois coeficientes angulares ( $\Delta D_p / \Delta q_m$ ), um antes e outro após o ponto de falha, com exceção dos tratamentos onde a falha foi constatada a partir do primeiro nível de fluxo.

Para a identificação do ponto de falha, interpretou-se a relação obtida pela média das repetições. Adotou-se esse procedimento, por considerar a área experimental relativamente uniforme, dentro de cada experimento, conforme os atributos caracterizados nas parcelas, e, os fluxos extras adicionados, para cada nível, foram semelhantes entre as repetições. Com isso, a variação na taxa de erosão, entre repetições, ocorreu por fatores que não foram detectados, sendo atribuídos ao acaso.

A decisão de escolha do ponto de falha, principalmente nos casos em que houve alguma incerteza, foi tomada com o auxílio dos critérios da observação visual a campo e das demais relações teóricas que serão mostradas adiante.

Experimento 1, realizado com o resíduo de milho

No experimento realizado sobre o resíduo cultural do milho, a relação entre  $D_p$  e  $q_m$ , obtida pela adição de fluxos extras de água nas parcelas durante a aplicação de chuva simulada, é mostrada na Figura 13. Houve um aumento na taxa de erosão com o aumento da taxa de descarga, para todos os tratamentos, conforme pode ser observado pelos coeficientes

angulares positivos. Segundo Bertol (1995), esse comportamento é atribuído ao aumento no volume e na velocidade de enxurrada, refletindo-se num aumento da energia cisalhante da mesma. Os menores coeficientes de determinação ( $r^2$ ), obtidos antes do ponto de falha, com exceção do tratamento C-M<sub>1/1</sub>, ocorreram pela dispersão dos valores entre as repetições, atribuída aos baixos valores de taxa de erosão. Esse comportamento é considerado normal para a natureza da pesquisa, onde o número de repetições é pequeno e a variabilidade é grande. Mesmo assim, os resultados são importantes, pois, mostram a tendência. Na menor dose do resíduo de milho, tanto no contorno quanto no morro abaixo, a  $D_p$  foi maior, em cada nível de fluxo, quando comparada com a maior dose. Isso demonstra a capacidade do resíduo cultural em dissipar a energia cinética das gotas de chuva e em funcionar como uma barreira física a ação da enxurrada e ao transporte de sedimentos, conforme Amaral et al. (2008).

Foi constatada, em todos os tratamentos, uma mudança na declividade da reta que relaciona as variáveis  $D_p$  e  $q_m$ , nos pontos indicados pelas setas na figura 13. A mudança na declividade ocorreu entre os níveis 5 e 6; 4 e 5; 4 e 5; e 3 e 4, nos tratamentos C-M<sub>1/1</sub>, C-M<sub>1/2</sub>, P-M<sub>1/1</sub> e P-M<sub>1/2</sub>, respectivamente. Com isso, identificou-se a falha do resíduo cultural de milho, demonstrando que, a partir de determinada taxa de descarga que representa a enxurrada proveniente de declives maiores, houve redução da eficácia do resíduo no controle da erosão hídrica, independentemente da quantidade do resíduo de milho e da direção de semeadura. O ponto de falha obtido por meio da relação teórica de erosão ocorreu no mesmo ponto onde houve a falha visual do resíduo a campo. Antes da falha, na presença do resíduo na superfície, a energia do fluxo superficial era distribuída, parte atuando no solo e parte atuando no resíduo. Com a remoção do resíduo, a energia cisalhante do fluxo atuou diretamente sobre o solo, mais concentrada em sulcos, o que aumentou a taxa de erosão em relação àquela verificada antes da falha.

Após a falha, os coeficientes angulares e os valores de  $D_p$  foram expressivamente maiores nos tratamentos que receberam a metade da dose do resíduo de milho. Sendo assim, na maior dose do resíduo, houve menor perda de eficiência do resíduo no controle da erosão hídrica. Quanto à taxa de descarga para a ocorrência da falha, necessitou-se de maior fluxo na maior dose em relação à menor, independentemente da direção de semeadura e, de maior fluxo na semeadura em contorno em relação ao morro abaixo, independentemente da dose do resíduo.

Na maioria dos tratamentos (C-M<sub>1/2</sub>, P-M<sub>1/1</sub> e P-M<sub>1/2</sub>), no ponto onde foi constatada a falha, o incremento na  $D_p$  foi menos pronunciado do que nos níveis subsequentes do ponto de falha. Segundo Foster et al. (1982), a falha nem sempre ocorre de forma abrupta. Esse

comportamento pode ser explicado pelo aprisionamento de parte dos sedimentos erodidos no resíduo deslocado e amontoado/ancorado nas porções inferiores da parcela. Com a adição de níveis maiores (maior taxa de descarga), parte do resíduo amontoado/ancorado foi removido, liberando os sedimentos aprisionados e aumentando a  $D_p$ .

Experimento 2, realizado com o resíduo de trigo

As relações entre  $D_p$  e  $q_m$ , referentes ao experimento realizado sobre o resíduo cultural de trigo, encontram-se na Figura 14. Antes de discutir os dados, é importante destacar que, em função das diferenças nos valores de  $D_p$ , nas figuras dos tratamentos morro abaixo as escalas estão três vezes maiores que nos tratamentos em contorno.

Nos tratamentos em contorno ao declive (C-T<sub>1/1</sub> e C-T<sub>1/2</sub>), a linearidade entre as variáveis foi observada. No entanto, os valores de  $D_p$  diminuíram com o aumento da  $q_m$  até o quarto nível de fluxo extra, independentemente da dose do resíduo de trigo na superfície do solo. Isso ocorreu devido à grande redução na concentração de sedimentos na enxurrada na medida em que aumentou o nível de fluxo, já que a taxa de descarga aumentou. Uma possível explicação para o ocorrido está relacionada à utilização das hastes sulcadoras durante a operação de semeadura e o tipo de cultura utilizada. O aumento da rugosidade orientada pelo preparo, pelo efeito das hastes, e o grande número de colmos de trigo dispostos contra o sentido do declive, tiveram grande efeito no controle da velocidade de enxurrada e funcionaram como uma eficiente barreira ao transporte de sedimentos, principalmente os mais grosseiros. Nos primeiros níveis de fluxo, com menores taxa de descarga, os sedimentos mais finos e prontamente disponíveis (devido à mobilização de solo na linha de semeadura) foram removidos pela enxurrada. Com o aumento da taxa de descarga, diminuíram os sedimentos prontamente disponíveis e os mais grosseiros ficaram retidos. Cabe lembrar que o número de plantas de trigo por metro de linha de semeadura era de 75, sendo que o número total de colmos no final do ciclo foi muito superior a este, devido à capacidade que as plantas de trigo têm de emitir perfilhos (colmos laterais rentes ao solo junto ao colmo principal). Nestes tratamentos, houve mudança na declividade da reta que relaciona as variáveis  $D_p$  e  $q_m$ , no intervalo entre os níveis 4 e 5. A partir desse ponto, os coeficientes angulares passaram a ser positivos, indicando aumento da  $D_p$  com o aumento de  $q_m$ . Com isso, identificou-se claramente o ponto em que ocorreu a falha do resíduo cultural de trigo. Com relação à visualização da falha no campo (item tal), houve similaridade entre o observado e o verificado pela relação teórica.

Quanto aos tratamentos morro abaixo, a falha ocorreu nos primeiros níveis de fluxo. No P-T<sub>1/1</sub>, os coeficientes angulares da relação  $D_p$  e  $q_m$  foram positivos, antes e após o ponto de falha, sendo que a mudança na declividade da reta foi observada entre os níveis 2 e 3. No P-T<sub>1/2</sub>, a falha ocorreu entre os níveis 1 e 2. Devido a isso, não foi possível obter o coeficiente angular antes da falha. Nesse tratamento, chama-se atenção para o fato de que, a partir da falha, no intervalo dos níveis 2 a 4 houve pequeno aumento na  $D_p$ , sendo que, entre os níveis 4 a 7, a inclinação da reta aumentou novamente. Com isso, houve dois intervalos de falha, entre os níveis 1 e 2 e 4 e 5. Esse comportamento pode ser atribuído ao resíduo semi-incorporado e ancorado na camada superficial do solo, nos locais onde houve mobilização pelas hastes sulcadoras, o que dificultou a remoção de solo na área dentro dos sulcos. No primeiro intervalo de falha, o resíduo, solto e não ancorado, e o solo, prontamente disponível dentro dos sulcos, foram transportados. Após isso, o resíduo, semi-incorporado e ancorado, dificultou a saída de solo dos sulcos, sendo, ambos, posteriormente removidos com o aumento da energia cisalhante da enxurrada, devido à adição de maiores níveis de fluxo. Nos tratamentos morro abaixo, o ponto de falha foi melhor identificado por meio da análise da relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada ( $C$ ) e taxa de descarga ( $q_m$ ), a qual será abordada no item tal. A observação visual a campo serviu de base para identificar uma possível falha do resíduo nos menores níveis de fluxo, já que não houve nitidez na identificação.

Os coeficientes angulares obtidos após a falha do resíduo de trigo foram relativamente pequenos nos tratamentos em contorno quando comparados aos morro abaixo. Isso foi perceptível ainda a campo, onde a quantidade de sedimentos produzidos era muito superior neste último, provenientes dos sulcos pré-formados pela operação de semeadura, os quais estavam dispostos no sentido do declive. Nos tratamentos com metade da dose do resíduo, houve um maior aumento nos coeficientes angulares após a falha, independentemente da direção de semeadura, demonstrando menor perda de eficiência do resíduo de trigo na maior dose para o controle da erosão hídrica. Da mesma forma como ocorrido no experimento 1 para o resíduo de milho, no geral, os valores de  $D_p$  foram inferiores na maior dose do resíduo de trigo em relação à menor dose, tanto antes quanto após a falha.

Com isso, pode-se constatar a falha do resíduo de trigo em todos os tratamentos, independentemente da direção de semeadura e da dose do resíduo. No entanto, a taxa de descarga necessária para a ocorrência do fenômeno diferenciou entre os tratamentos. Dentro de cada dose, na semeadura em contorno necessitou-se de maior taxa de descarga para a ocorrência da falha em relação ao morro abaixo e, dentro de cada direção de semeadura, no

contorno, a falha ocorreu com taxas de descarga semelhantes entre as doses e, na semeadura morro abaixo, maior taxa foi necessária para a maior dose.

Experimento 3, realizado com o resíduo de soja

No teste sobre o resíduo cultural da soja, as relações entre  $D_p$  e  $q_m$  encontram-se na Figura 15. Devido à variação nos valores de  $D_p$ , as escalas nas figuras referentes aos tratamentos morro abaixo estão duas vezes maiores que naquelas dos tratamentos em contorno.

Nos tratamentos C-S<sub>1/1</sub>, C-S<sub>1/2</sub> e P-S<sub>1/1</sub>, constatou-se a quebra de linearidade e mudança na declividade da reta que relaciona as variáveis  $D_p$  e  $q_m$  entre os níveis 4 e 5; 2 e 3; e 2 e 3, respectivamente. No P-S<sub>1/2</sub> não foi possível obter o coeficiente angular na relação dos dados anteriores a falha, devido a ela ter ocorrido entre os níveis 1 e 2.

Os valores de  $D_p$ , entre repetições, apresentaram menor dispersão nesse experimento do que nos demais, o que resultou em maiores valores de  $r^2$  dos coeficientes angulares da equação linear, anteriores ao ponto de falha. Após o ponto de falha, os coeficientes angulares foram altos em todos os tratamentos, sendo maiores na metade da dose, independente da cada direção de semeadura e, maiores, na semeadura morro abaixo, independente da dose do resíduo. Os valores elevados deste coeficiente indicam grande redução de eficácia do resíduo de soja após a falha, aumentando significativamente a  $D_p$ . A taxa de descarga necessária para a ocorrência da falha foi menor na metade da dose e na semeadura morro abaixo, quando comparadas com a maior dose e o contorno, respectivamente.

Após a falha, ocorreram variações na inclinação da reta entre as variáveis relacionadas, possivelmente ocasionadas pelo fato do resíduo ora estar amontoado/ancorado ora deslocado pelo maior fluxo, respectivamente ora aprisionando e ora liberando parte dos sedimentos em suspensão no fluxo. No entanto, para o estabelecimento da falha, optou-se pela obtenção de um único coeficiente angular. No tratamento P-S<sub>1/1</sub>, a mudança na declividade da reta entre os níveis 2 e 3 não foi tão nítida, sendo melhor perceptível entre os níveis 4 e 5. No entanto, antes da falha, um aumento de 70% na  $q_m$  aumentou 65% a  $D_p$ . Na falha, entre os níveis 2 e 3, o aumento de 45% na  $q_m$  aumentou 95% a  $D_p$ . Além disso, a observação visual da falha auxiliou a definir com segurança este intervalo como sendo o da ocorrência da falha, pois, foi possível observar claramente o sulcamento do solo a partir da parte inferior da parcela, conforme comentado no item tal.

No campo, durante a execução do teste, foi observado que o resíduo de soja, por ser leve e pela baixa rugosidade solo, foi facilmente deslocado pela enxurrada, deixando o solo com pouca cobertura após a falha. A combinação de baixa cobertura do solo, baixa densidade de colmos (pouco eficientes na filtragem de sedimentos) e a pequena rugosidade criada pelos discos da semeadora, potencializaram a erosão nesse experimento.

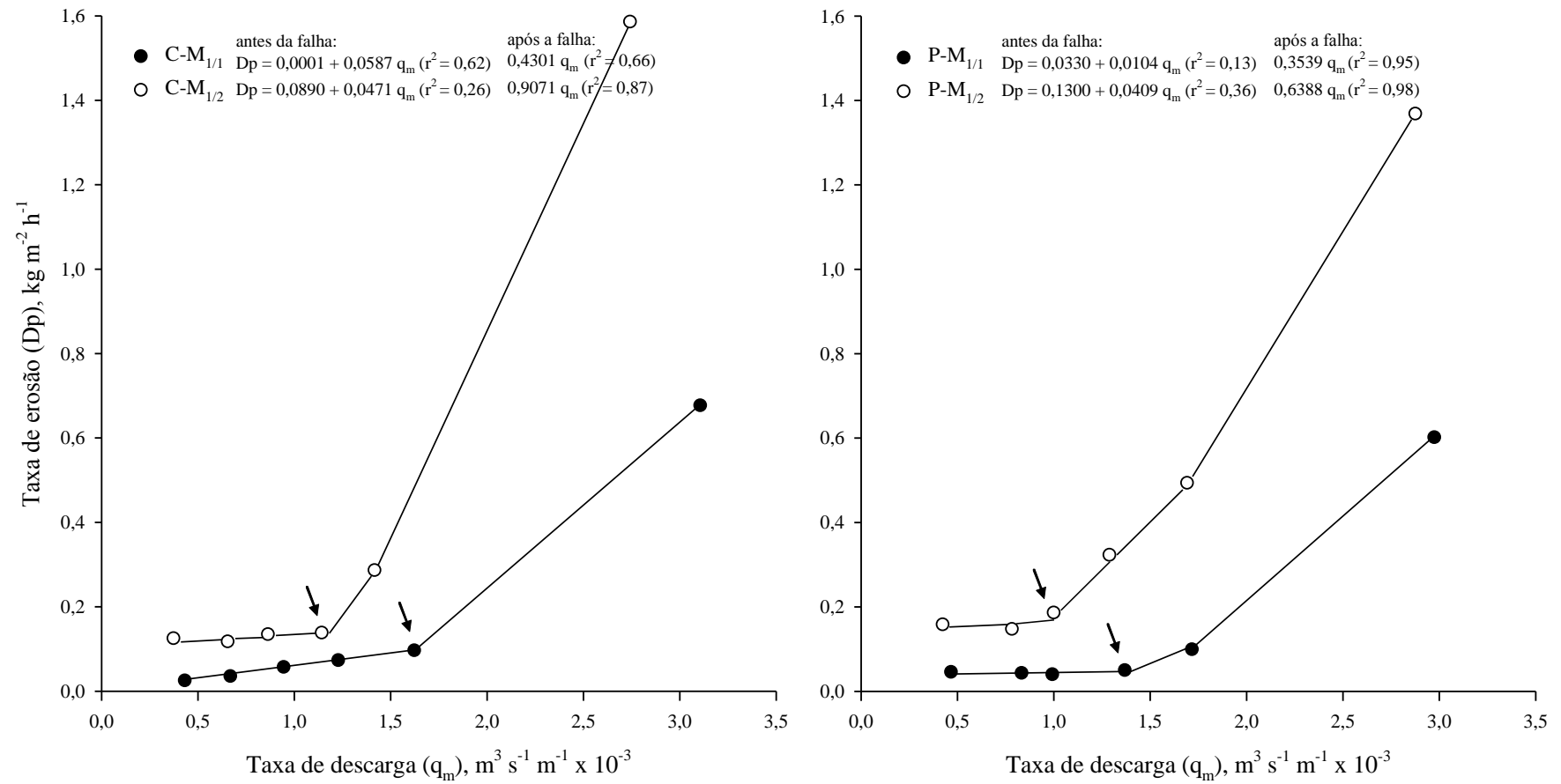


Figura13 - Relação entre a taxa de erosão ( $D_p$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho



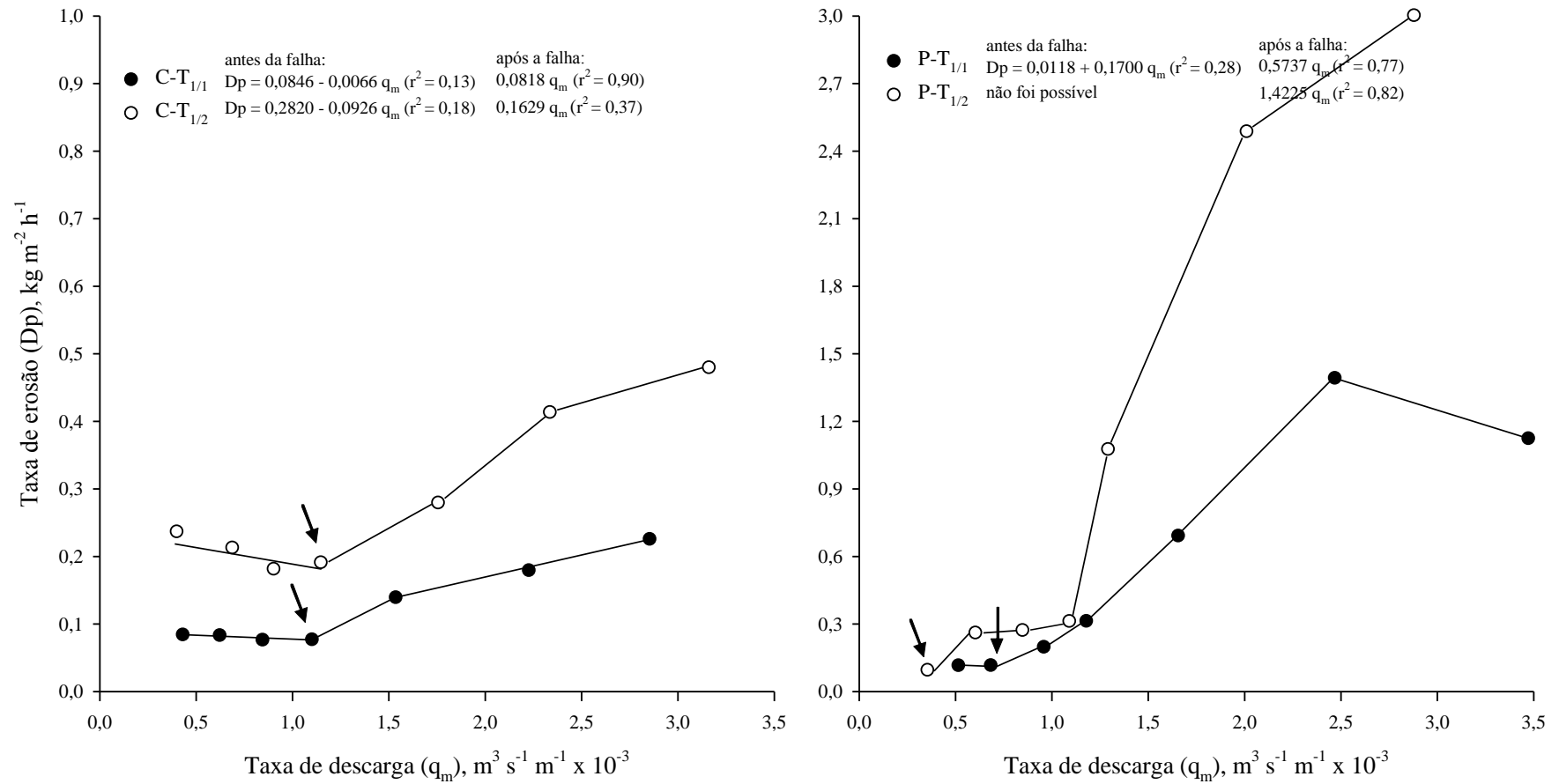


Figura 14- Relação entre a taxa de erosão ( $D_p$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo

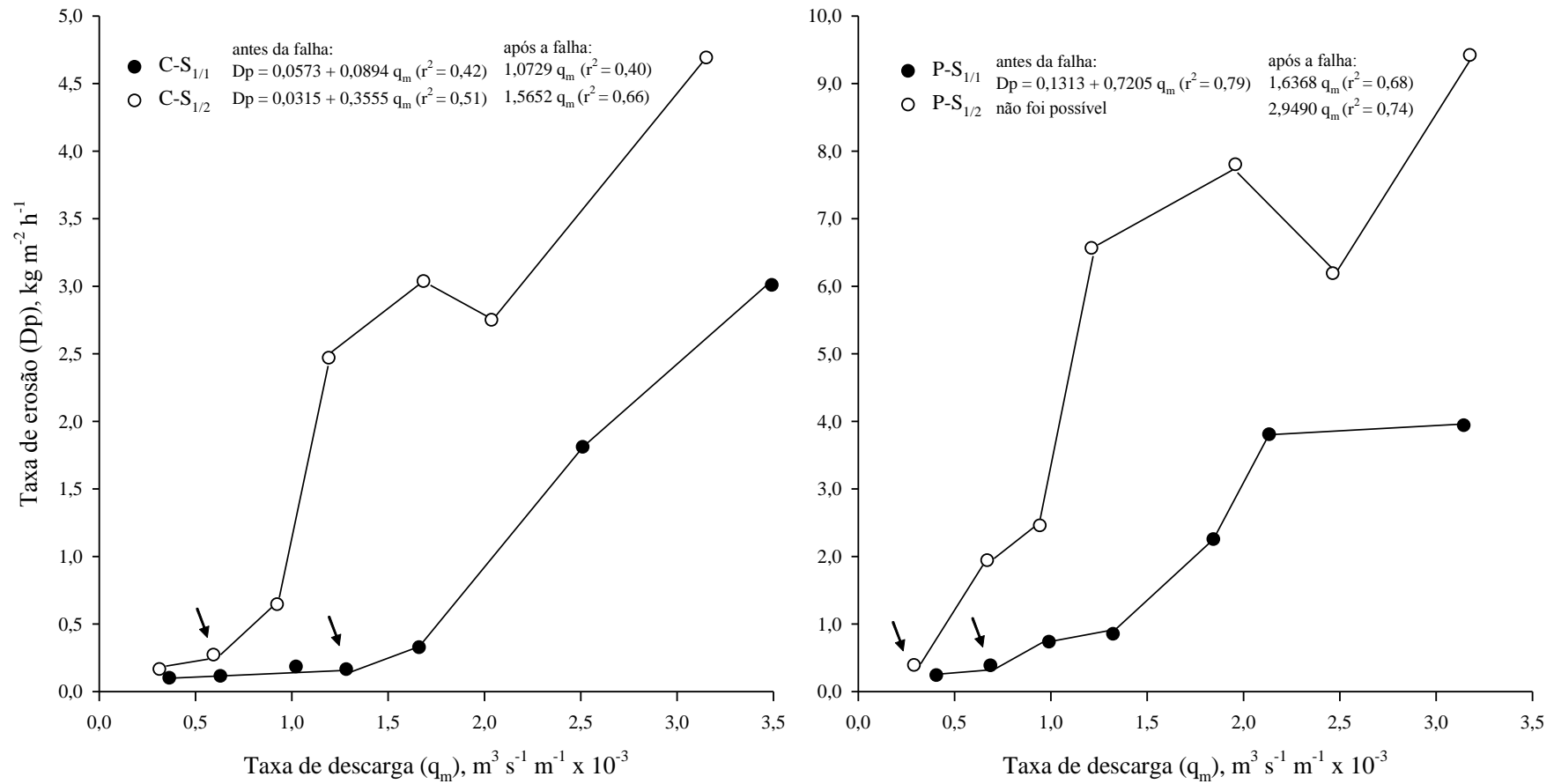


Figura 15 - Relação entre a taxa de erosão ( $D_p$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja

### 6.7.2 Relação concentração de sedimentos na enxurrada (C) x taxa de descarga ( $q_m$ )

As relações entre C e  $q_m$ , referentes aos experimentos 1, 2 e 3, são mostradas nas figuras 16, 17 e 18. Conforme Foster et al. (1982), a C diminui com o aumento da  $q_m$ , anterior a ocorrência da falha dos resíduos. Quando ocorre a falha, a C pode aumentar. Com base nisso, o aumento na C foi utilizado para escolher o ponto de falha. Foram ajustadas equações do tipo polinomial inversa de primeira ordem ( $y = a + (b/x)$ ), com os dados antes do momento da falha, embasada na teoria dos referidos autores. Para isso, foram utilizadas as repetições de tratamentos, embora, nas figuras, constem os valores médios. Pelo fato de os valores de taxa de erosão (item tal) serem calculados por meio do produto da concentração de sedimentos na enxurrada pela taxa de descarga, grande parte da discussão feita para a relação  $D_p \times q_m$  serve para explicar o comportamento da relação C x  $q_m$ . Por isso, esta relação será abordada brevemente.

#### Experimento 1, realizado com o resíduo de milho

As relações entre C e  $q_m$ , no experimento realizado sobre o resíduo de milho, constam na Figura 16. Nos tratamentos estudados, a C tendeu a diminuir com o aumento da  $q_m$ , até o ponto de falha. Esta tendência foi menos aparente no tratamento C-M<sub>1/1</sub>. A eficiência da cobertura no controle da erosão hídrica, a redução das partículas de solo prontamente disponíveis ao transporte na superfície do solo e o efeito de diluição dos sedimentos nas maiores taxas de descarga, explicam a redução da C. Os baixos valores de  $r^2$  devem-se as variações na magnitude de redução da C entre as repetições.

Nos mesmos intervalos onde houve a mudança na inclinação da reta da relação  $D_p \times q_m$ , a C aumentou, de forma nítida, indicando a falha do resíduo cultural de milho. Com isso, a remoção do resíduo pela energia cisalhante do fluxo concentrado aumentou a produção de sedimentos e a taxa de erosão em sulcos. Destaca-se, ainda, a grande diferença na concentração de sedimentos entre as doses do resíduo, comprovando que a cobertura do solo é realmente o principal fator que diminui a erosão hídrica. Isso decorre do efeito do resíduo em reduzir a desagregação de solo e o transporte de sedimentos, além de aumentar a deposição dos sedimentos dentro da própria área.

#### Experimento 2, realizado com o resíduo de trigo

No teste sobre o resíduo cultural de trigo, a relação entre  $C$  e  $q_m$ , consta na figura 17. Chama-se atenção na interpretação dos valores de  $C$ , pois nas figuras dos tratamentos morro abaixo, as escalas estão duas vezes maiores do que naqueles em contorno ao declive.

A falha do resíduo foi identificada nos tratamentos morro abaixo. No P-T<sub>1/2</sub>, ocorreu entre os níveis 1 e 2, onde a  $C$  aumentou 32%. No P-T<sub>1/1</sub>, entre os níveis 1 e 2, a  $C$  diminuiu 30%. No entanto, entre os níveis 2 e 3, considerado o intervalo da falha, a  $C$  aumentou 40%.

O indicador teórico  $C \times q_m$  não detectou a falha do resíduo de trigo nos tratamentos em contorno. A concentração de sedimentos diminuiu nos primeiros níveis de fluxo e tendeu a estabilizar nas maiores taxas de descarga. Nos intervalos onde foi constatada a falha do resíduo pela relação  $D_p \times q_m$ , não houve aumento considerável na  $C$ . Provavelmente isso ocorreu, pois, neste caso, o aumento na erosão em sulcos foi pequeno após a falha. Com isso, a taxa de erosão, que resulta do produto da concentração de sedimentos pela taxa de enxurrada, teve sensibilidade em detectar o aumento da contribuição dos sulcos para a erosão hídrica. Na relação  $D_p \times q_m$ , os coeficientes angulares obtidos após a falha foram baixos, indicando que o incremento na taxa de erosão foi realmente baixo, com a falha.

A concentração de sedimentos estabilizou em valores próximos de 0,25 e 0,52 g L<sup>-1</sup>, nos tratamentos C-T<sub>1/1</sub> e C-T<sub>1/2</sub>, respectivamente, enquanto que, após a falha, nos tratamentos P-T<sub>1/1</sub> e P-T<sub>1/2</sub>, a concentração de sedimentos aumentou substancialmente, atingindo picos de 1,60 e 3,75 g L<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo ambos observados no sexto nível de fluxo. Assim como os valores de  $D_p$ , a  $C$  mostrou ser sempre superior nos tratamentos que receberam a metade da dose de resíduo.

### Experimento 3, realizado com o resíduo de soja

Na figura 18, são mostradas as relações entre  $C$  e  $q_m$ , obtidas para o experimento realizado sobre o resíduo cultural da soja. Para a visualização dos dados, em virtude da variação dos valores de  $C$ , os dados nas figuras dos tratamentos morro abaixo estão em escala três vezes maior do que aqueles dos tratamentos em contorno.

No P-S<sub>1/2</sub>, a  $C$  aumentou 113% entre os níveis de fluxo 1 e 2. Com isso, foi constatada a falha do resíduo no primeiro intervalo. Nos tratamentos C-S<sub>1/2</sub> e P-S<sub>1/1</sub>, a  $C$  foi pouco afetada (com leve diminuição) entre os níveis 1 e 2, aumentando 50% (em ambos os tratamentos) no intervalo entre os níveis 2 e 3. No C-S<sub>1/1</sub>, a  $C$  diminuiu do primeiro ao quarto nível de fluxo, aumentando 59% no quinto nível. Em todos os tratamentos foi possível definir o intervalo de falha, o qual foi condizente com o verificado pela relação  $D_p \times q_m$ .

Com a falha do resíduo de soja, a C aumentou expressivamente, influenciada pela dose (maior na menor dose) e pela direção de semeadura (maior no morro abaixo). Foram observados picos de 2,65; 5,93; 5,07; e 20,26 g L<sup>-1</sup>, no C-S<sub>1/1</sub>, C-S<sub>1/2</sub>, P-S<sub>1/1</sub> e P-S<sub>1/2</sub>, respectivamente.

### 6.7.3 Relação velocidade de enxurrada (V) x taxa de descarga (q<sub>m</sub>)

As relações entre V e q<sub>m</sub>, referentes aos experimentos 1, 2 e 3, são mostradas nas figuras 19, 20 e 21. Utilizou-se a equação do tipo potencial de dois parâmetros ( $y = a x^b$ ), a qual foi ajustada até o intervalo anterior da mudança no comportamento da relação, quando ocorreu. Para isso, foram utilizadas as repetições de tratamentos, embora, nas figuras, constem os valores médios.

#### Experimento 1, realizado com o resíduo de milho

As relações entre V e q<sub>m</sub>, no teste de chuva realizado no experimento sobre o resíduo de milho, constam na Figura 19. Em todos os tratamentos, a V aumentou com o aumento da q<sub>m</sub>. No entanto, a taxa de aumento diferiu entre eles. Nos tratamentos em contorno, a mesma decresceu com os maiores fluxos, enquanto que nos morro abaixo, a taxa foi cada vez maior. Isso fica melhor identificado ao observar os valores do parâmetro “b” da equação, os quais foram inferiores e superiores a unidade (um), no contorno e no morro abaixo, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, no cultivo em contorno, as fileiras de plantas (soqueiras), os pequenos diques (rugosidade orientada) e o resíduo, ficaram dispostos de maneira a formarem barreiras que dificultaram o percurso livre da enxurrada, além de aumentarem a tortuosidade do fluxo. Ao comparar as doses do resíduo de milho, dentro de cada direção de semeadura, a velocidade de enxurrada foi sempre superior na metade da dose. Segundo Bertol (1995), isso pode ser atribuído ao retardamento do escoamento superficial provocado pelo resíduo, que também funciona como uma barreira a ação da enxurrada. Os coeficientes de determinação das equações (r<sup>2</sup>), obtidos para esta relação, apresentaram valores elevados, influenciados pela menor variação de valores entre as repetições.

Quanto à ocorrência de falha do resíduo, foi observada uma mudança no comportamento da relação V x q<sub>m</sub>, apenas no tratamento C-M<sub>1/1</sub>, onde a inclinação da curva relacionando as variáveis aumentou. O intervalo em que a mesma ocorreu, entre os níveis 5 e

6, correspondeu com o intervalo de falha verificado pela observação visual e pelas relações teóricas de erosão discutidas anteriormente. Conforme Foster et al. (1982), a mudança no comportamento da curva, relacionando as variáveis, pode ocorrer pela alteração na rugosidade hidráulica da superfície do solo, devido a remoção dos resíduos, e/ou pela mudança no grau de sulcamento do solo. Nos demais tratamentos, não foi identificada a alteração na relação entre  $V$  e  $q_m$ .

#### Experimento 2, realizado com o resíduo de trigo

As relações entre  $V$  e  $q_m$ , no teste de chuva realizado no experimento sobre o resíduo de trigo, constam na Figura 20. Da mesma forma como observado no experimento 1 com o resíduo de milho, a velocidade de enxurrada aumentou pelos aumentos de  $q_m$ . Na semeadura em contorno, elas foram pouco influenciadas pela dose do resíduo, enquanto que, na semeadura morro abaixo, aumentaram na menor dose. O parâmetro “b” da equação, que representa a taxa de aumento de  $V$  com o aumento de  $q_m$ , foi superior na semeadura morro abaixo. Nos tratamentos em contorno, independente da dose, os incrementos na velocidade de enxurrada foram relativamente baixos, não ultrapassando o valor de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  no último nível de fluxo extra, o qual representa o maior comprimento de rampa simulado no estudo. A maior eficiência na redução da velocidade de enxurrada no contorno, nesse experimento, pode estar associada à rugosidade orientada criada pelas hastes sulcadoras acopladas à semeadora e a grande densidade de colmos de trigo dispostas contra o sentido do declive, conforme já comentado no item tal.

Foi constatada uma alteração na inclinação da curva da relação  $V \times q_m$  nos tratamentos C-T<sub>1/1</sub> e P-T<sub>1/2</sub>. Ela ocorreu entre os níveis 5 e 6 e 3 e 4, respectivamente. No primeiro, a mudança foi pouco aparente, com ligeiro aumento no incremento da velocidade de enxurrada, enquanto que, no segundo, o aumento foi pronunciado, chegando ao valor de  $1,33 \text{ m s}^{-1}$  no último nível de fluxo extra. Os intervalos mencionados não corresponderam com os intervalos de falha identificados pela análise da taxa de erosão e da concentração de sedimentos, sendo maiores que estes. Nos outros dois tratamentos (C-T<sub>1/2</sub> e P-T<sub>1/1</sub>), não foi observada a mudança na relação. Nos tratamentos morro abaixo, os sulcos formados pela operação de semeadura e as linhas da cultura dispostas morro abaixo, potencializaram o efeito da enxurrada em adquirir velocidade.

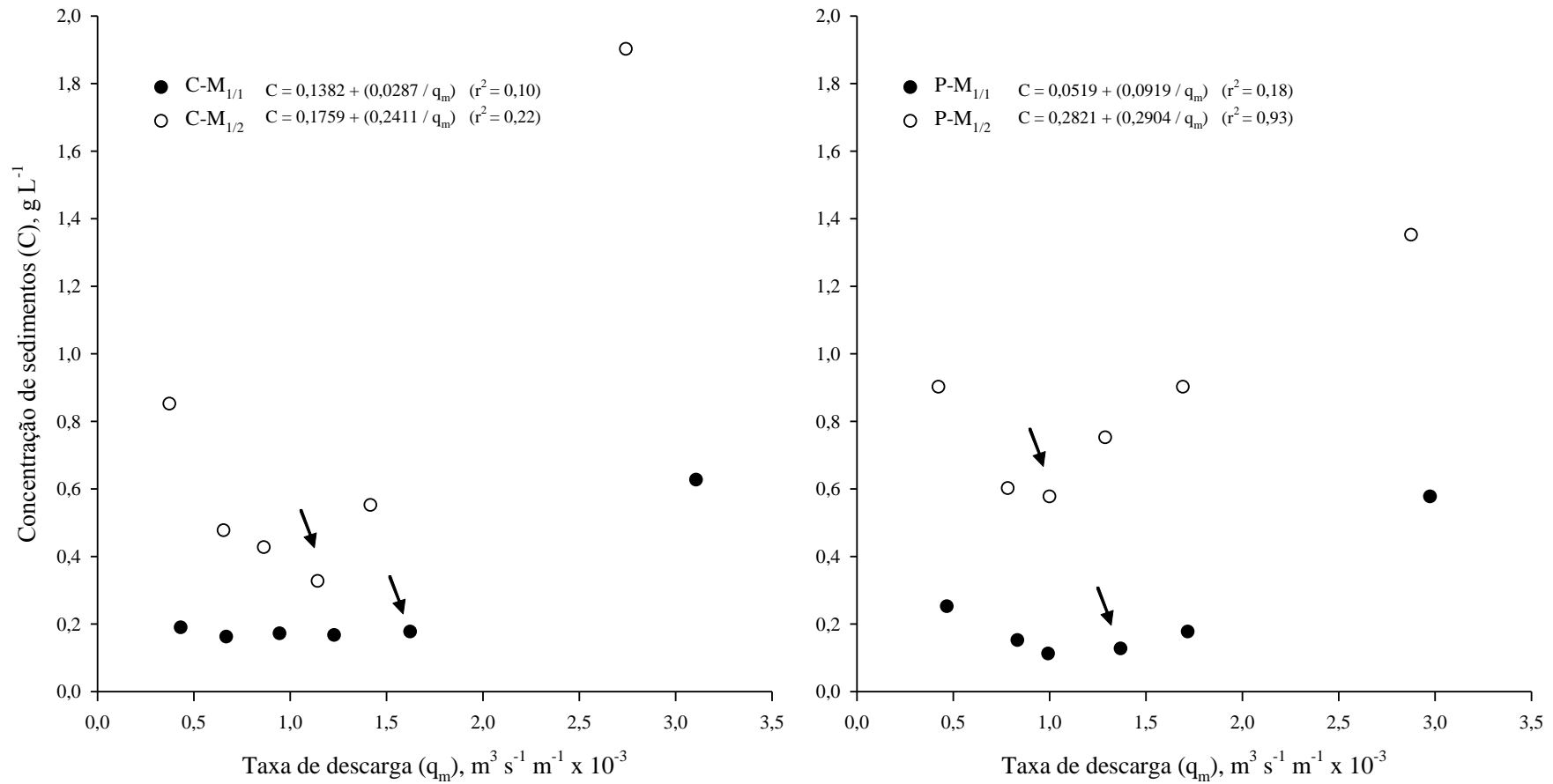


Figura 16 - Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (q<sub>m</sub>), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho

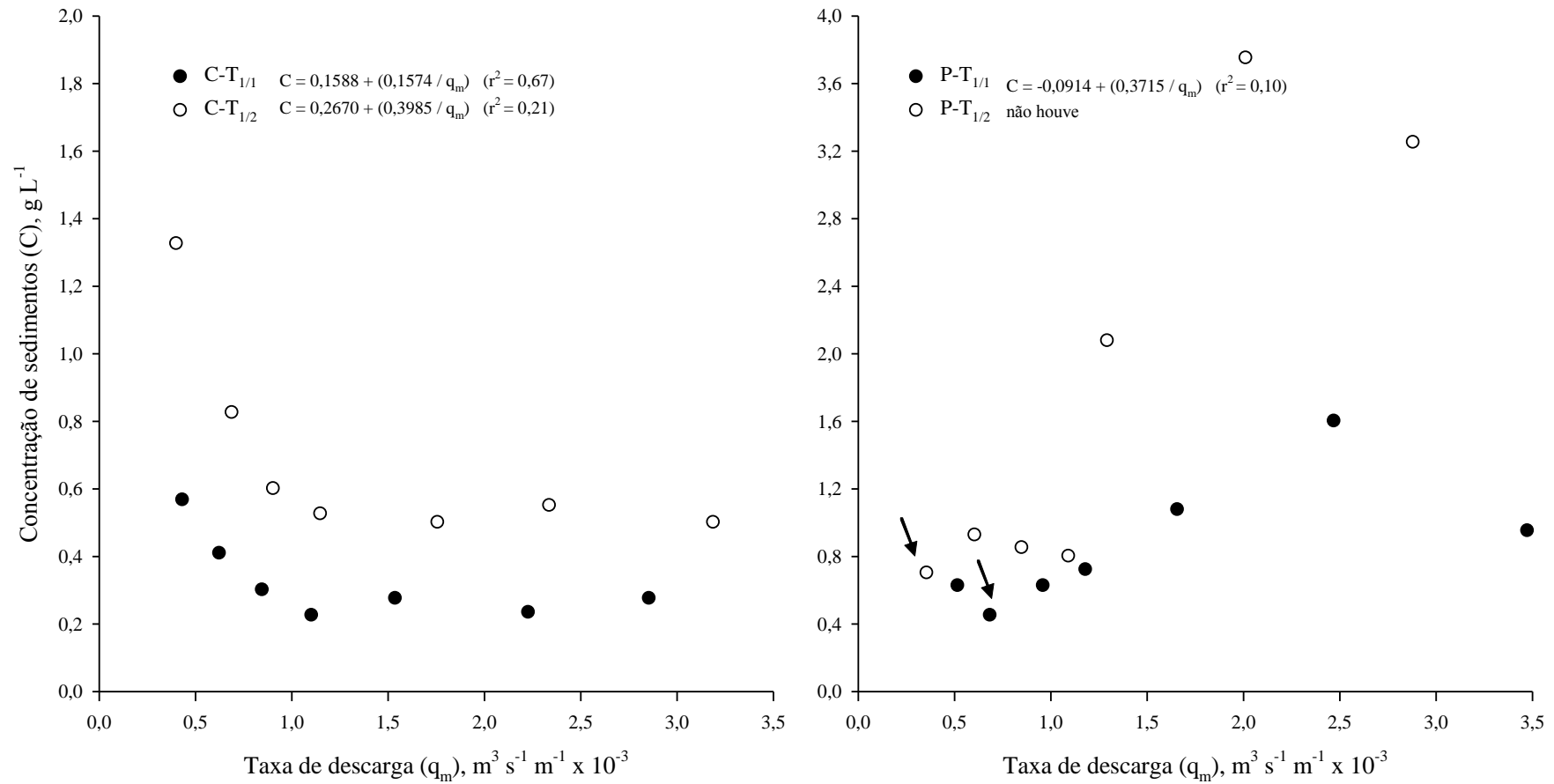


Figura 17 - Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo



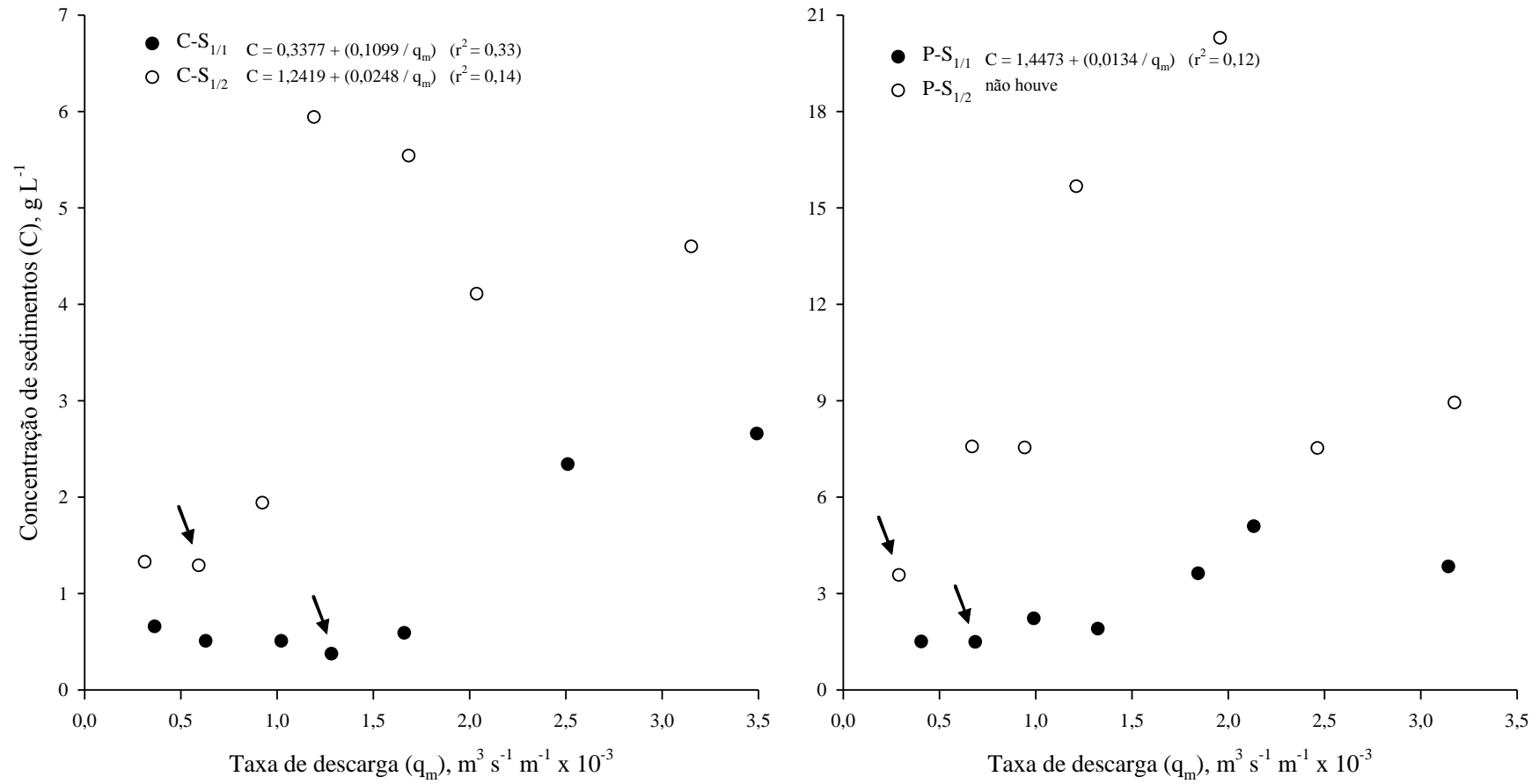


Figura 18 - Relação entre a concentração de sedimentos na enxurrada (C) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental (qm), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja

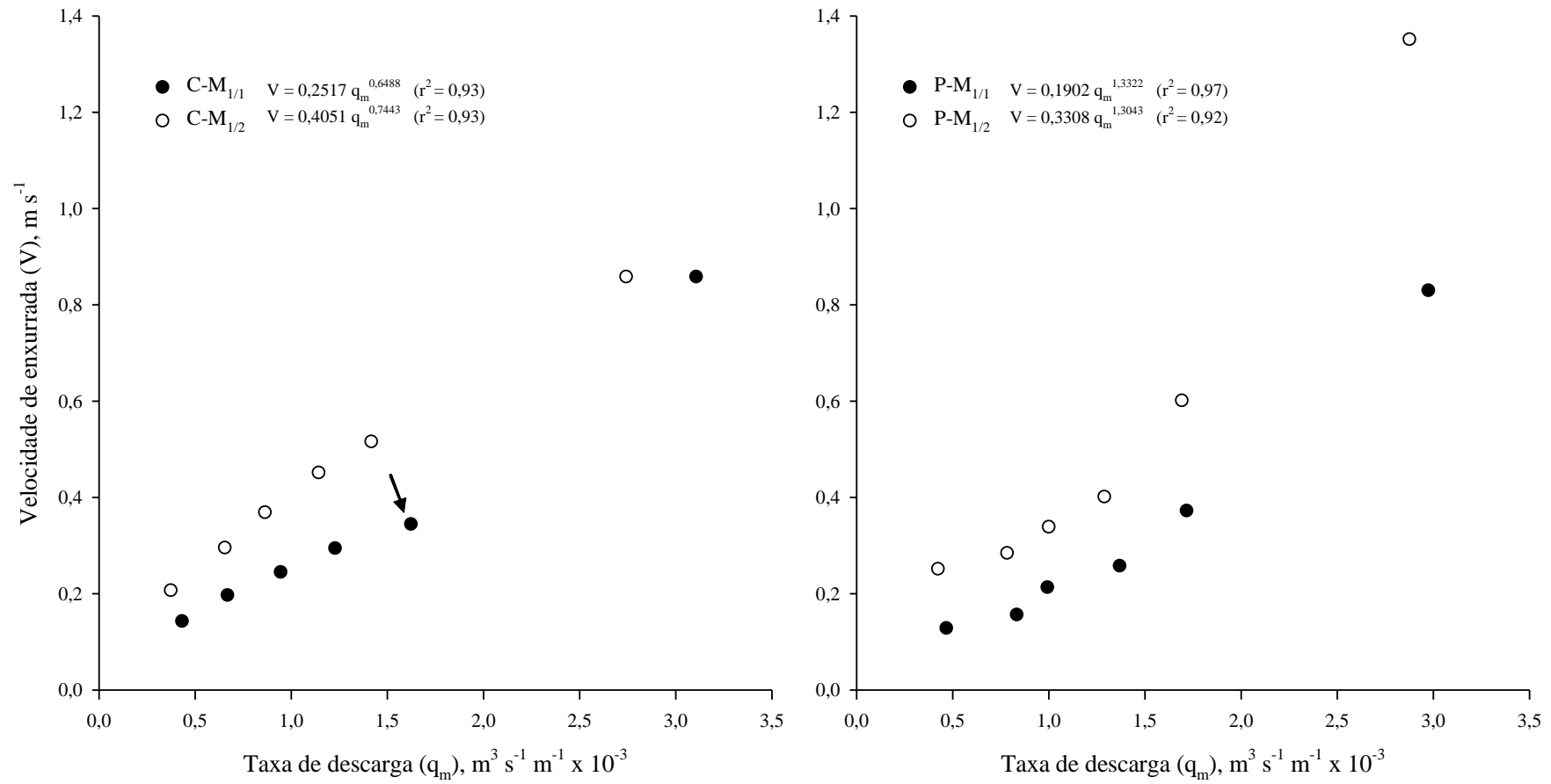


Figura 19 - Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho

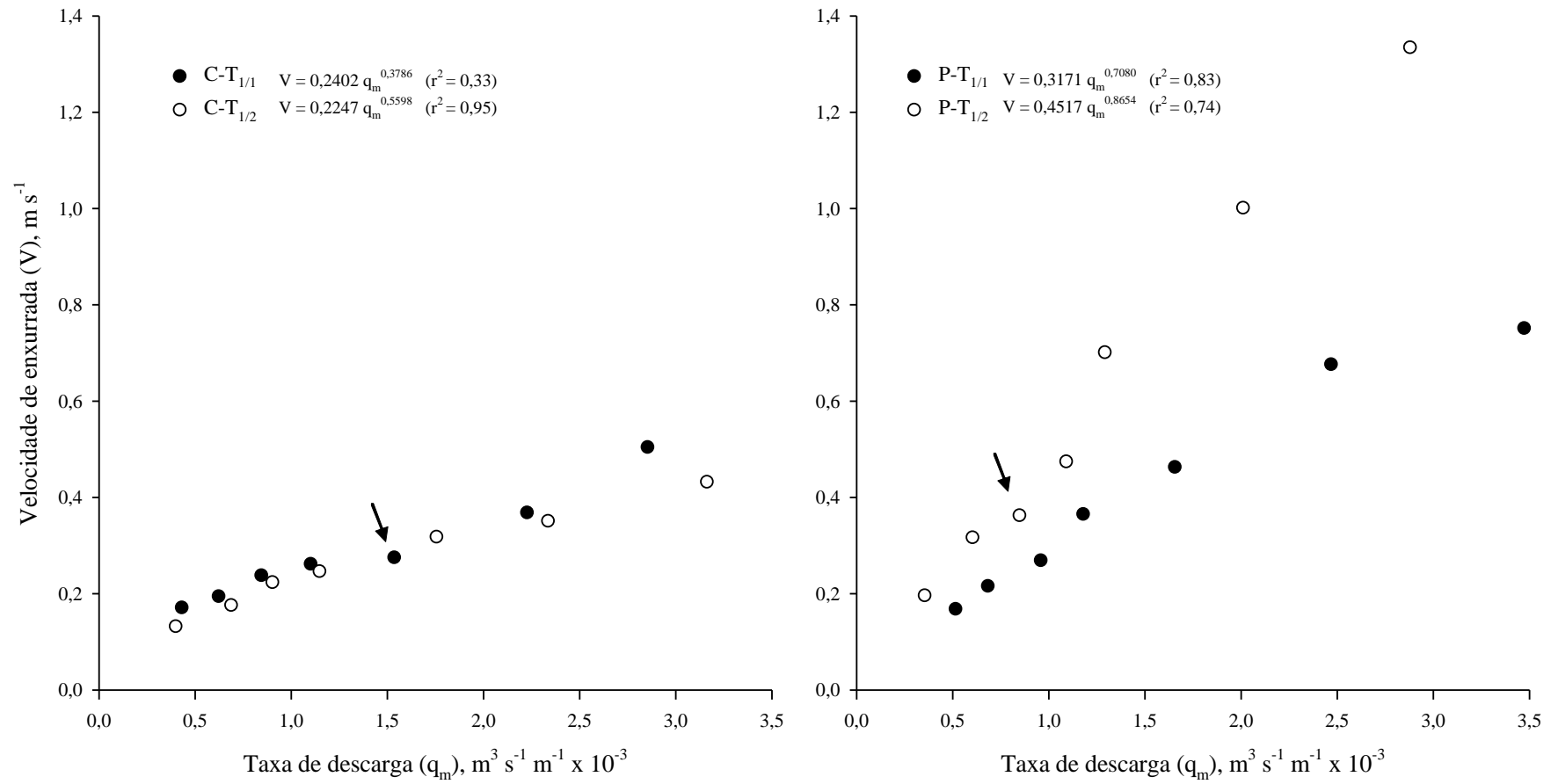


Figura 20 - Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo

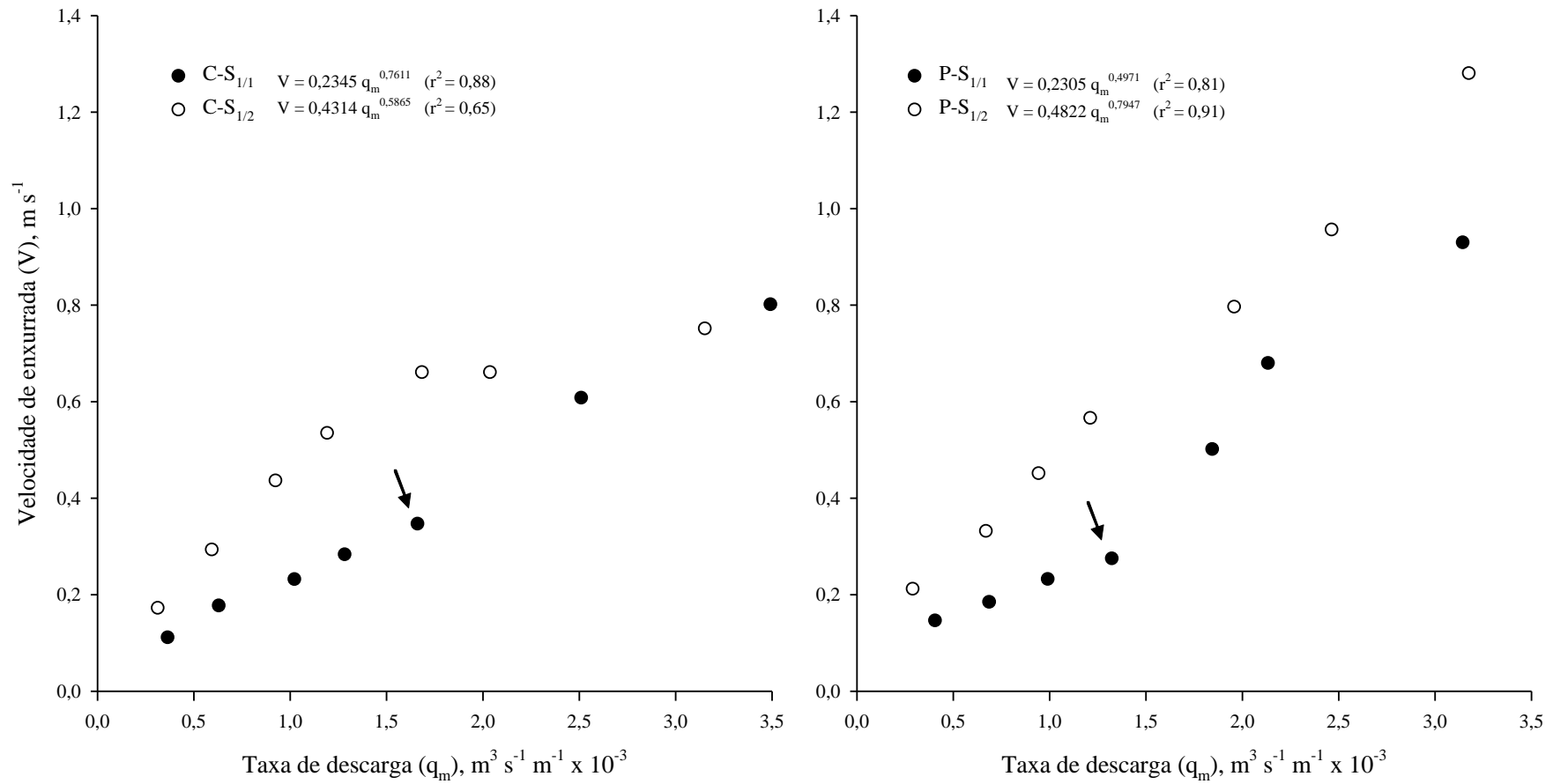


Figura 21 - Relação entre a velocidade de enxurrada ( $V_e$ ) e a taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental ( $q_m$ ), nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja

### Experimento 3, realizado com o resíduo de soja

As relações entre  $V$  e  $q_m$ , no teste de chuva realizado no experimento sobre o resíduo de soja, constam na Figura 21. Houve aumento na velocidade de enxurrada como o aumento da taxa de descarga em todos os tratamentos. No C-S<sub>1/1</sub> e P-S<sub>1/1</sub>, entre os níveis 5 e 6 e 4 e 5, respectivamente, foi observada mudança na inclinação da curva relacionando as variáveis. Em ambos, correspondeu ao ponto onde houve remoção do resíduo por toda a extensão da parcela (11m), verificado na visualização em campo. No entanto, não correspondeu com o ponto de falha identificado com os indicadores  $D_p \times q_m$  e  $C \times q_m$ . Conforme discutido anteriormente, no C-S<sub>1/1</sub>, houve possível sulcamento do solo no momento anterior ao nível de fluxo que removeu o resíduo. No P-S<sub>1/1</sub>, entre os níveis 2 e 3, houve o sulcamento do solo e remoção do resíduo na parte inferior da parcela. Neste caso, não foi detectada a mudança neste intervalo, pois a velocidade de enxurrada foi medida em um segmento de 6 m, conforme consta em Material & Métodos. Nos tratamentos C-S<sub>1/2</sub> e P-S<sub>1/2</sub>, não foi observada mudança na inclinação da curva relacionando  $V$  e  $q_m$ .

Observando a figura, a sementeira em contorno mostrou menor eficiência em controlar a velocidade de enxurrada do que nos experimentos 1 e 2. Provavelmente isso ocorreu devido ao tipo de resíduo (leve, pequena quantidade e menor capacidade de ancoramento) e ao uso apenas dos discos na sementeira que criaram pouca rugosidade e ocasionaram pouco ancoramento dos resíduos na camada superficial do solo, o que poderia aumentar a resistência dos mesmos ao transporte.

### Síntese das relações teóricas de falha dos resíduos

As relações  $D_p \times q_m$  e  $C \times q_m$  foram mais sensíveis na detecção do ponto de falha dos resíduos do que a relação  $V \times q_m$ . As duas primeiras relações, quando analisadas conjuntamente, facilitaram a identificação. A menor sensibilidade da relação  $V \times q_m$  pode ser explicada conforme o que foi observado no campo. Com o início do escoamento superficial, a enxurrada, mesmo sob baixa energia, deslocava-se preferencialmente nas depressões naturais do terreno, por mais uniforme que ele fosse ou, no caso dos tratamentos morro abaixo, pelos sulcos orientados ocasionados pela sementeira e nas entrelinhas das soqueiras remanescentes das plantas. Devido a isso, na maioria dos casos, não houve a identificação da mudança esperada na relação  $V \times q_m$  em decorrência da falha, pois o regime de escoamento não passou abruptamente de laminar para concentrado em sulcos. No entanto, é importante deixar claro,

que o escoamento da água por locais preferenciais antes da falha não significou que houve o sulcamento do solo, pois a tensão cisalhante do fluxo não havia superado a resistência do solo e/ou dos resíduos ao transporte. Segundo Cantalice et al. (2005), a erosão nos sulcos caracteriza-se pelo fluxo concentrado com tensão de cisalhamento suficiente para desagregar o solo, deformando o sulco e alterando as características do escoamento. Aliado a isso, a metodologia utilizada para medição da velocidade da enxurrada não apresentava grande precisão, pois era feita visualmente, baseada no deslocamento de um corante no fluxo. Isso, de certa forma, contribuiu para a não identificação da alteração na hidráulica do fluxo.

A mudança na inclinação da curva resultante da relação  $V \times q_m$ , na maioria dos casos em que foi detectada, ocorreu nos tratamentos com a maior dose de resíduos, correspondendo ao ponto onde foi visualizada a remoção por toda a extensão da parcela. Nesses casos, parte dos resíduos que eram ancorados/amontoados durante o deslocamento, mudavam o deslocamento do fluxo e, conseqüentemente, a velocidade de enxurrada no segmento medido na parcela.

Os coeficientes de determinação das equações, anterior a falha, foram menores para as relações  $D_p \times q_m$  e  $C \times q_m$  e maiores para a  $V \times q_m$ . Isso ocorreu em função da maior dispersão dos dados nas duas primeiras relações. Segundo Portela et al. (2011), a variação entre repetições de tratamentos em pesquisa de erosão hídrica, a campo, são maiores para as variáveis relacionadas à perda de solo (concentração de sedimentos e taxa de perda de solo) do que as relacionadas às variáveis hidrológicas (taxa de enxurrada, por exemplo). A velocidade de enxurrada, também considerada uma variável hidrológica, teve comportamento semelhante neste estudo.

O ponto de falha dos resíduos culturais obtidos pelos indicadores  $D_p \times q_m$  e  $C \times q_m$  foram, na maioria das situações, condizentes com a falha visual no campo. Já o ponto de falha obtido pela relação  $V \times q_m$  foi relacionado ao deslocamento em massa dos resíduos pela extensão total da parcela, principalmente na maior dose.

De modo geral, a dose de resíduos e a direção de semeadura afetaram o ponto de falha dos resíduos culturais, sendo maior a taxa de descarga necessária para a ocorrência do fenômeno na maior dose e na semeadura em contorno, em relação à menor dose e ao morro abaixo, respectivamente. No entanto, independentemente da dose e da direção de semeadura, ela foi detectada. Com base nas informações obtidas, pode-se confirmar a teoria da falha desenvolvida por Foster et al. (1982).

## 6.8 Comprimentos críticos de declive

Os comprimentos críticos de declive obtidos para os diferentes tratamentos, nos experimentos 1, 2 e 3, foram considerados como os comprimentos simulados equivalentes ao nível de fluxo anterior à ocorrência da falha dos resíduos. Adotou-se esse critério por ser mais conservacionista, oferecendo maior segurança para possíveis recomendações a nível de campo, já que a falha dos resíduos em geral ocorre em comprimentos de rampa maiores que o comprimento crítico, e também porque a falha poderia ter ocorrido em qualquer taxa de descarga entre o ponto de falha e o anterior a ela. Portanto, o comprimento crítico obtido foi uma aproximação do comprimento crítico real, podendo ser igual ou menor. A escolha de um nível de fluxo imediatamente antes da falha (nível de fluxo crítico) é correta, pois, permite a certeza de que a tensão do fluxo neste ponto não é superior a resistência imposta pelo resíduo e/ou solo.

O comprimento crítico de declive foi definido pelo indicador mais restritivo, ou seja, que estabeleceu o menor comprimento de rampa, já que a falha dos resíduos, em alguns casos, não ocorreu no mesmo nível de fluxo extra nos diferentes indicadores (visual e relações teóricas  $D_p \times q_m$ ,  $C \times q_m$  e  $V \times q_m$ ).

Conforme identificada a falha dos resíduos, o comprimento crítico de declive ( $L_c$ ) ocorreu para todos os tratamentos, nos três experimentos (Tabela 7). Sobre o resíduo de milho, variou de 108 a 155 m, no de trigo, de 44 a 147 m, enquanto que, no de soja, de 35 a 137 m. De uma maneira geral, a semeadura em contorno e a maior dose de resíduos, aumentaram o  $L_c$  em relação ao morro abaixo e a menor dose, respectivamente. Na média, os aumentos foram de 21%, 124% e 82% no contorno em relação ao morro abaixo e de 19%, 28% e 110% na maior dose em relação à menor, respectivamente aos experimentos 1, 2, e 3. Com isso, ressalta-se a importância das maiores quantidades de resíduos para aumentar o comprimento crítico de declive. Também comprova-se que a prática conservacionista complementar “cultivo em contorno” dificulta a remoção dos resíduos pelo fluxo superficial, aumentando o comprimento crítico de declive.

Para condições semelhantes ao experimento (grau de compactação e tipo de solo, intensidade de precipitação e declividade), os comprimentos críticos podem ser sugeridos como locais de alocação e de espaçamento entre obras de contenção de enxurrada, como os terraços agrícolas, pois, a partir deste ponto no terreno, os resíduos culturais teriam sua eficiência reduzida no controle da erosão hídrica. No entanto, é importante deixar claro, que o espaçamento sugerido não contempla a tolerância de perda de solo e nem a capacidade de

armazenamento ou de drenagem dos canais de terraços, os quais poderão estabelecer comprimentos de rampa maiores ou menores que o comprimento crítico.

No presente trabalho, como não foi possível testar diferentes declividades para os tratamentos, em função da necessidade de aumento do número de parcelas e da mão-de-obra que inviabilizaria a execução da pesquisa, escolheu-se área de declividade uniforme e representativa para a região. Chama-se atenção a este fato, pois, para declividades menores que a do experimento, os comprimentos críticos de declive poderiam ser extrapolados com uma grande margem de segurança, na falta de maiores informações.

#### 6.9 Comparativo entre tolerância de perda de solo e falha dos resíduos

Conforme comentado no item anterior, o comprimento crítico de declive não contempla comprimentos de rampa onde as perdas de solo poderiam ultrapassar a tolerância para determinado tipo de solo, podendo ser maiores ou menores que este. Com base nisso, neste trabalho, fez-se um comparativo entre os dois. Para isso, as perdas totais de solo ocorridas nos 9 min de duração de cada nível de fluxo extra, foram divididas pelo índice de erosividade  $EI_{30}$  ( $132 \text{ Mj mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) da chuva simulada de  $65 \text{ mm h}^{-1}$ , deste intervalo de tempo, resultando na perda de solo por unidade de índice  $EI_{30}$ . O mesmo procedimento foi feito para a tolerância de perda de solo, onde a perda máxima permitida anualmente foi dividida pelo índice de erosividade médio anual da região. Foram utilizados os dados da erosividade para o município de Lages-SC ( $5.790 \text{ Mj mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), obtido em trabalho de Bertol et al. (2002), sendo este o local mais próximo do experimento (distante aproximadamente 25 km) no qual haviam informações, e os dados da tolerância de perda de solo para o Nitossolo Bruno ( $1,05 \text{ mm ano}^{-1}$ ), sugerido por Bertol & Almeida (2000). A tolerância foi multiplicada pela densidade média do solo da camada superficial das unidades experimentais ( $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ ), resultando em limites de perda de  $14.500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Com isso, obteve-se uma tolerância de  $2,50 \text{ kg ha}^{-1}$  por unidade de  $EI_{30}$ . Quando a perda de solo nos diferentes tratamentos atingiu o valor tolerável, estabeleceu-se o comprimento de rampa no qual, a partir deste, as perdas de solo seriam superiores ao limite considerado.

Conforme as figuras 22, 23 e 24 e a tabela 8, a tolerância de perda de solo foi superada em todos os tratamentos, a partir de determinado comprimento de rampa, com exceção do C-T<sub>1/1</sub> (experimento 2). No último comprimento de declive testado, as perdas foram de 2,5 a 7,0 vezes, de 2,0 a 13,0 vezes e de 12 a 40 vezes maiores que o limite tolerável, nos experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. Os dados são extremamente preocupantes, pois existem extensas



áreas de lavouras sob semeadura direta no sul do Brasil, em solos do tipo deste experimento ou semelhantes, combinadas com grandes comprimentos de rampa e declividades, nas quais não são adotadas práticas conservacionistas de suporte.

Os comprimentos de rampa baseados na tolerância de perda de solo foram superiores aos comprimentos críticos de declive, nos experimentos 1 e 2. Para o resíduo de milho, em todos os tratamentos, eles ocorreram no mesmo intervalo da mudança da declividade das retas relacionando a  $D_p \times q_m$ . No entanto, para o comprimento crítico, foi estabelecido o ponto anterior a falha. Para o resíduo de trigo, no tratamento C-M<sub>1/1</sub>, as perdas de solo não superaram a tolerância até o maior comprimento de rampa testado. Nos tratamentos C-M<sub>1/2</sub> e P-M<sub>1/2</sub> eles ocorreram no mesmo intervalo da ocorrência da falha, enquanto no P-M<sub>1/1</sub>, após a falha. No experimento 3, nos tratamentos morro abaixo, independentemente da dose, o comprimento estabelecido pela tolerância foi menor do que o comprimento crítico de declive. Em ambos, no primeiro nível de fluxo extra, que representa o menor comprimento simulado, as perdas de solo já haviam ultrapassado o limite tolerável. O tratamento em contorno que recebeu a metade da dose de resíduo teve comprimento crítico semelhante ao da tolerância de perda de solo, enquanto que na maior dose, o comprimento crítico foi menor.

É importante salientar que o comparativo realizado pode apresentar certas limitações, pois as perdas de solo obtidas nos tratamentos, em cada experimento, podem não representar as perdas reais para cada comprimento de rampa, pois as taxas de erosão representam apenas o segmento final do declive simulado.

#### 6.10 Tensão crítica de cisalhamento

A tensão crítica de cisalhamento total (solo + resíduo) foi computada como sendo igual à tensão cisalhante total do fluxo no ponto anterior ao da ocorrência da falha. Com isso, a mesma é uma estimativa aproximada, podendo ser menor ou igual à tensão crítica real, a qual poderia ter ocorrido em qualquer intervalo entre a falha e o ponto anterior a ela. Na tabela tal constam os valores referentes à tensão crítica de cisalhamento, assim como a profundidade total do fluxo (lâmina de escoamento), a qual possui relação direta com a tensão de cisalhamento, conforme pode ser verificado em material e métodos.

No experimento 1, realizado sobre o resíduo de milho, a tensão crítica de cisalhamento variou de 4,1 a 6,8 N m<sup>-2</sup>, sendo afetada pela dose do resíduo e pouco influenciada pela direção de semeadura (Tabela 9). A maior dose resultou em um aumento de 81% na tensão crítica, em comparação com a menor dose, na média geral.

No experimento 2, realizado sobre o resíduo de trigo, a tensão crítica variou de 2,7 a 6,4 N m<sup>-2</sup>, sendo pouco influenciada pela dose do resíduo na semeadura em contorno, enquanto que, no morro abaixo, a maior dose aumentou a tensão crítica em 83%, em relação a menor dose. Dentro de cada dose do resíduo, o contorno aumentou a tensão crítica em relação ao morro abaixo.

No experimento 3, realizado sobre o resíduo de soja, a tensão crítica variou de 1,9 a 6,6 N m<sup>-2</sup>, sendo superior na maior dose e na semeadura em contorno, quando comparadas com a menor dose e o morro abaixo, respectivamente.

No geral, na semeadura em contorno, com exceção no experimento 1, necessitou-se de maior lâmina de escoamento para a tensão cisalhante do fluxo se igualar a resistência imposta para o início do movimento dos resíduos e sulcamento do solo. O mesmo ocorreu para a maior dose dos resíduos em relação à menor dose, com exceção dos tratamentos em contorno no experimento 2. Quanto as exceções, no experimento 1, pode ser atribuído ao fato de que as maiores taxas de descarga nos tratamentos em contorno, anteriores a falha, não foram suficientes para aumentar a profundidade do fluxo em relação ao morro abaixo, o que gerou tensões críticas de cisalhamento semelhantes, embora comprimentos críticos de declive diferentes. No experimento 2, a taxa de descarga e a velocidade de enxurrada anteriores a falha foram iguais entre os tratamentos em contorno, independentemente da dose. Com isso, a profundidade do fluxo foi a mesma. Quanto ao comprimento crítico de declive (item tal), foi ligeiramente maior no contorno na maior dose, fato este exclusivamente devido à menor taxa constante de enxurrada da chuva inicial, já que o ponto de falha foi o mesmo.

Tabela 7 - Nível crítico de fluxo extra (anterior a falha); taxa de descarga no ponto médio da parcela experimental crítico (qm); critérios que identificaram o ponto de falha e comprimento crítico de declive, nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja

Tratamento	Nível de fluxo extra anterior a falha (nível crítico)	qm anterior a falha (qm crítico) $\frac{\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \times 10^{-3}}$	Indicadores que detectaram o ponto de falha dos resíduos	Comprimento crítico de declive m
Experimento 1 – Resíduos de milho				
C-M <sub>1/1</sub>	5°	1,63	Visual; Dp x qm; C x qm; V x qm	155
C-M <sub>1/2</sub>	4°	1,15	Visual; Dp x qm; C x qm	126
P-M <sub>1/1</sub>	4°	1,37	Visual; Dp x qm; C x qm	124
P-M <sub>1/2</sub>	3°	1,00	Visual; Dp x qm; C x qm	109
Experimento 2 – Resíduos de trigo				
C-T <sub>1/1</sub>	4°	1,10	Visual; Dp x qm	147
C-T <sub>1/2</sub>	4°	1,15	Visual; Dp x qm	135
P-T <sub>1/1</sub>	2°	0,69	Dp x qm; C x qm	82
P-T <sub>1/2</sub>	1°	0,36	Dp x qm; C x qm	44
Experimento 3 – Resíduos de soja				
C-S <sub>1/1</sub>	4°	1,29	Dp x qm; C x qm	137
C-S <sub>1/2</sub>	2°	0,60	Visual; Dp x qm; C x qm	66
P-S <sub>1/1</sub>	2°	0,69	Visual; Dp x qm; C x qm	76
P-S <sub>1/2</sub>	1°	0,29	Visual; Dp x qm; C x qm	35

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

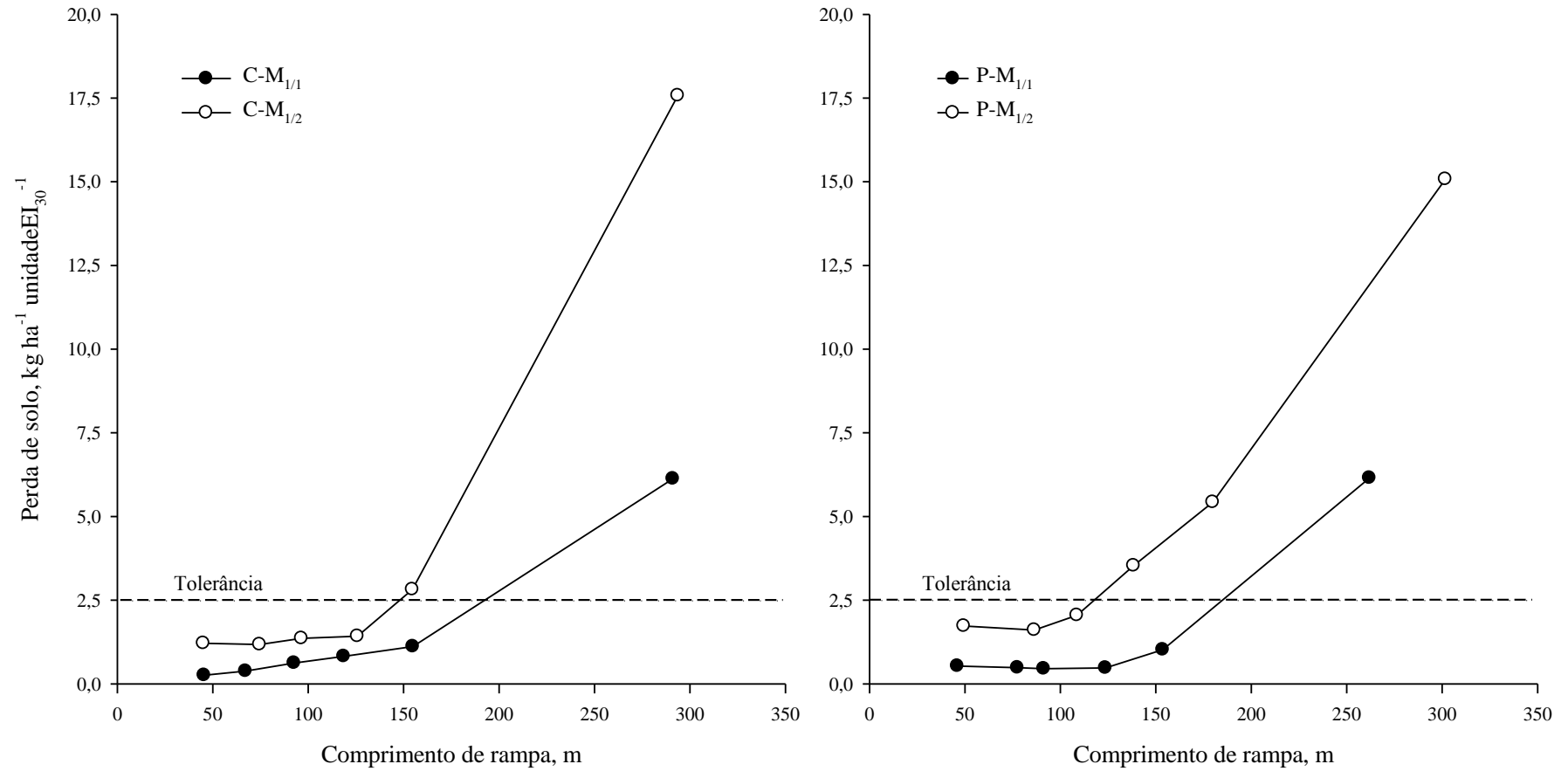


Figura 22 - Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de milho

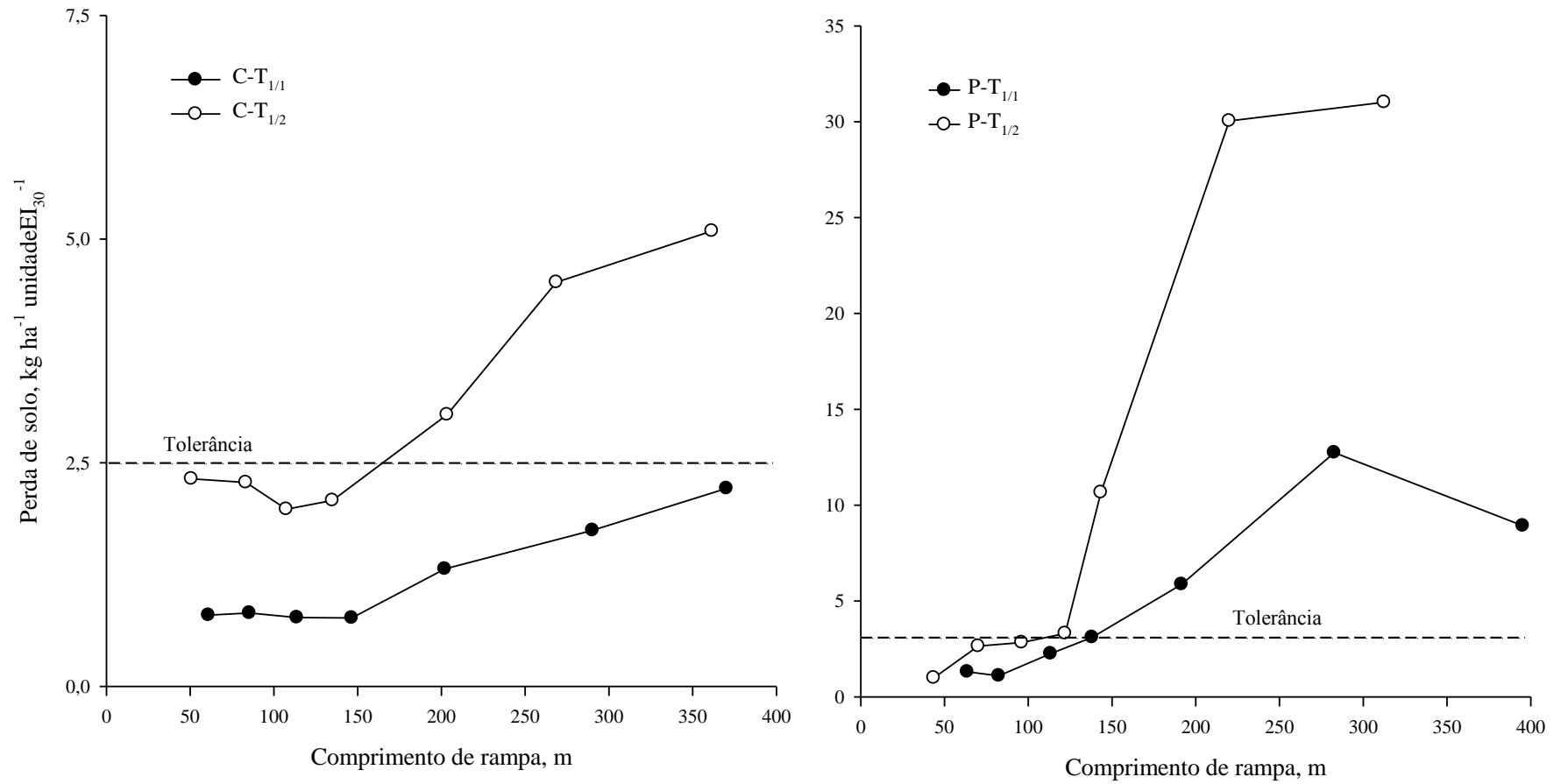


Figura 23 - Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de trigo

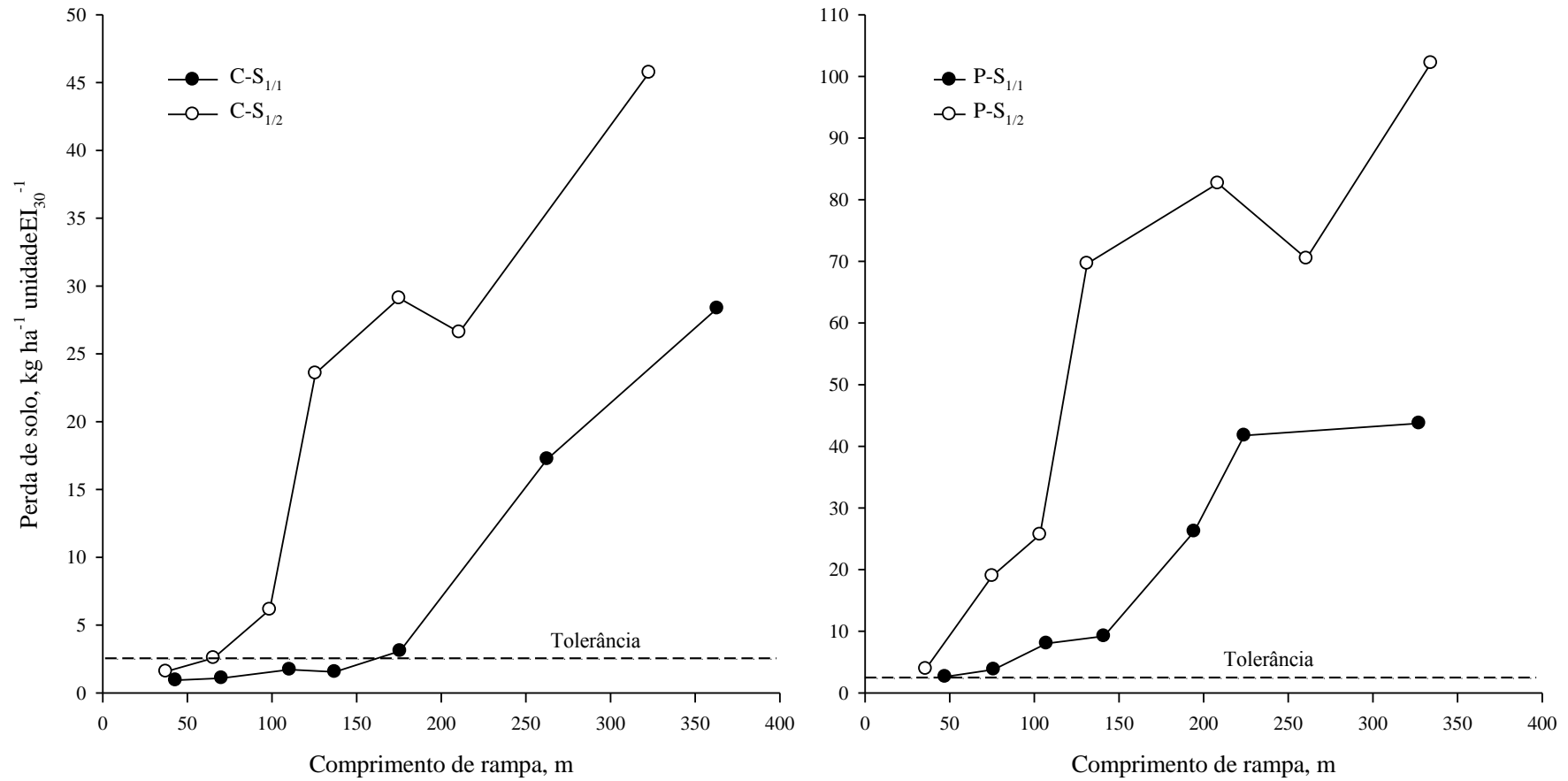


Figura 24 - Relação entre a perda de solo (PS) nos tratamentos com o comprimento de rampa, nos diferentes tratamentos estudados, no teste de chuva realizado sobre os resíduos culturais de soja

Tabela 8 - Comprimento de rampa crítico pelo critério da falha dos resíduos e da tolerância de perda de solo, nos diferentes tratamentos, nos experimentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja, num Nitossolo Bruno

Tratamento	Comprimento de declive, m	
	Crítico pela falha dos resíduos	Crítico pela tolerância de perda de solo
Experimento 1		
C-M <sub>1/1</sub>	155	193
C-M <sub>1/2</sub>	126	149
P-M <sub>1/1</sub>	124	185
P-M <sub>1/2</sub>	109	118
Experimento 2		
C-T <sub>1/1</sub>	147	> 370
C-T <sub>1/2</sub>	135	183
P-T <sub>1/1</sub>	82	120
P-T <sub>1/2</sub>	44	68
Experimento 3		
C-S <sub>1/1</sub>	137	161
C-S <sub>1/2</sub>	66	64
P-S <sub>1/1</sub>	76	< 47
P-S <sub>1/2</sub>	35	< 35

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

Tabela 9 - Nível crítico de fluxo extra (anterior a falha); profundidade total do fluxo e tensão crítica de cisalhamento, nos diferentes tratamentos sobre os resíduos de milho, trigo e soja

Tratamento	Nível de fluxo extra anterior a falha (nível crítico)	Profundidade total do fluxo	Tensão crítica de cisalhamento
		m x 10 <sup>-3</sup>	N m <sup>-2</sup>
Experimento 1			
C-M <sub>1/1</sub>	5	4,8	6,7
C-M <sub>1/2</sub>	4	2,6	3,6
P-M <sub>1/1</sub>	4	5,4	7,4
P-M <sub>1/2</sub>	3	3,0	4,2
Experimento 2			
C-T <sub>1/1</sub>	4	4,6	6,4
C-T <sub>1/2</sub>	4	4,7	6,7
P-T <sub>1/1</sub>	2	3,2	4,5
P-T <sub>1/2</sub>	1	1,9	2,7
Experimento 3			
C-S <sub>1/1</sub>	4	4,7	6,6
C-S <sub>1/2</sub>	2	2,1	3,0
P-S <sub>1/1</sub>	2	3,9	5,4
P-S <sub>1/2</sub>	1	1,4	1,9

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

## 7 CONCLUSÕES

1. Existe comprimento crítico de declive em semeadura direta para o solo estudado, independentemente da direção de semeadura, tipo e dose de resíduos.
2. A relação taxa de erosão ( $D_p$ ) x taxa de enxurrada ( $q_m$ ) mostrou-se eficaz na detecção do comprimento crítico de declive.
3. O comprimento crítico de declive pelo critério da falha visual no campo foi identificado para o resíduo de milho e soja, enquanto que para o trigo, não foi possível com clareza.
4. A semeadura realizada em contorno ao sentido do declive e a maior dose dos resíduos de milho, trigo e soja aumentaram o comprimento crítico de declive em relação à semeadura morro abaixo e à menor dose, respectivamente.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.E. & ARKIN, G.F. A light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:789-792, 1977.
- AMARAL, A.J. Erosão hídrica e limites críticos de comprimento de declive para seu efetivo controle, em diferentes tipos e doses de resíduo cultural e dois modos de semeadura direta. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. 144p. (Tese de Doutorado)
- AMARAL, A.J.; BERTOL, I.; COGO, N.P. e BARBOSA, F.T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2145-2155, 2008.
- 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.
- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 185p. (Tese de Doutorado)
- BERTOL, I. & COGO, N.P. Terraceamento em sistemas de preparo conservacionista de solo: um novo conceito. Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Lages, SC, 1996. 41p. (Boletim Técnico no 1)
- BERTOL, I.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Comprimento crítico de declive em sistemas de preparos conservacionistas de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:139-148, 1997.
- 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*, 24:657-668, 2000.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; VISENTIN, D. & COGO, N.P. Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC). *R. Bras. Ci. Solo*, 26:455-464, 2002
- CANTALICE, J.R.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M. & BORGES, A.L.O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-arenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:597-607, 2005.

- COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage-induced roughness and slope length on erosion and related parameters. Tese de Doutorado. Indiana. Purdue University, West Lafayette, 1981. 346p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10 ed. Porto Alegre: SBCS-NRS, 2004. 400p.
- DERNARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FLORES, C.A.; FERREIRA, T.N.; CASSOL, E.A.; MONDARDO, A. & SCHWARZ, R.A. Manejo de enxurrada em sistema plantio direto. Porto Alegre: Fórum estadual de solo e Água, 2005. 88p.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies-part I. Agric. Engin., 28:145-146, 1947.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.
- FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B. e MOLDENHAUER, W.C. Critical slope lengths for unanchored cornstalk and wheat straw residue. Trans. Of the ASAE, p.935-947, 1982.
- 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, 1975. p. 107-120.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A. ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society Agronomy, 1965. p.499-510.
- MEYER, L.D. An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity, and kinetic energy of selected spray nozzles. **USDA-ARS-SWCRD-ESWMRB** and Purdue University West Lafayette, 1958. IN.43p. (Special Report nº 81)
- MEYER, L.D. & McCUNE, D.L. Rainfall simulator for runoff plots. Agricultural Engineers, St. Joseph, 39:644-648. 1958.
- MORAIS, L.F.B. Comentários críticos de declive para diferentes manejos de resíduos culturais no sistema plantio direto em um solo Podzólico da Depressão Central-RS. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 162p. (Tese de Doutorado)

- MORAIS, L. F. B. & COGO, N. P. Comprimentos críticos de rampa para diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um Argissolo Vermelho na Depressão Central-RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:1.041-1.051, 2001.
- 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, 1997. 384p. (Agriculture Handbook, 703)
- SWANSON, N.P. A rotating-boom rainfall simulator. *Transactions of the American Society Agronomy Engineering*, St. Joseph, 26:1738-1743. 1965.
- TEDESCO, M. J. et al. *Análise de solos, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174p.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Am. Geophysical Union.*, 39:285-291, 1958.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, USDA., 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537)