

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO  
SOLO NAS PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL NO SUL DO BRASIL E URUGUAI**

**TESE DE DOUTORADO**

**Renato Beppler Spohr**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2007**

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO  
NAS PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL  
NO SUL DO BRASIL E URUGUAI**

**Por**

**Renato Beppler Spohr**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola**

Orientador: Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO NAS  
PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO SUL DO  
BRASIL E URUGUAI**

elaborada por  
**Renato Beppler Spohr**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
Doutor em Engenharia Agrícola

**COMISSÃO EXAMINADORA**



**Reimar Carlesso, Ph.D.**  
(Presidente / Orientador)



**Juan Pacheco Seguí, Dr.** (UCLV / Cuba)



**Mario Garcia Petillo, Dr.** (UR / Uruguai)



**Cláudio García Gallarréta, Dr.** (INIA / Uruguai)



**Flávio Luiz Foletto Eltz, Ph.D.** (DS/UFSM)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2007.

**Spohr, Renato Beppler, 1976-**

**S762i**

Influência das características físicas do solo nas perdas de água por escoamento superficial no Sul do Brasil e Uruguai / por Renato Beppler Spohr ; orientador Reimar Carlesso. – Santa Maria, 2007.

105 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2007.

1. Engenharia agrícola 2. Infiltração de água 3. Teor de argila 4 Compactação do solo I. Carlesso, Reimar, orient. II. Título

CDU: 631.432(81+899)

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

---

© 2007

Todos os direitos autorais reservados a Renato Beppler Spohr. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Campus da UFSM, Rua Q, Prédio 68, Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Fone / Fax (0xx) 55 3220 8399; End. Eletr. renatospohr@gmail.com.br

---

À Deus por me dar saúde, paz e alegria,

À minha esposa Rose, por estar sempre ao meu lado, compreender, incentivar e amar,

À meus pais, Ilmar (*in memoriam*) e Reni, e meus irmãos, que sempre me apoiaram e incentivaram em todas minhas decisões,

DEDICO este trabalho

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria (pública e gratuita), ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Reimar Carlesso, pela orientação e amizade, muito importantes para a minha formação científica.

Ao professor Flavio Luiz Foletto Eltz, pela amizade, coorientação e valiosa ajuda na condução desse trabalho.

Ao amigo Cláudio García Gallarréta, pela parceria e valiosa ajuda na condução desse trabalho e em todos os momentos.

Aos professores Fernando Garcia Préchac, Mario Garcia Petillo (Universidade da República, Uruguai), e Juan Pacheco Seguí (Universidad Central de Las Villas, Cuba) pelas sugestões e contribuições ao trabalho.

Ao Instituto Nacional de Investigacion Agropecuária – INIA, por ceder espaço nas suas estações experimentais, laboratórios e proporcionar a viabilização desse trabalho no Uruguai.

Aos professores que ministraram as aulas no decorrer do Curso, pelos ensinamentos e disponibilidade de tempo sempre que necessário.

Aos meus colegas e amigos Alberto, Alexandre, Brantan, Célio, Cleiton, Cleudson, Christopher, Felipe, Giovanni, Gustavo, Juliano de Andrade, Juliano Martins, Marcio, Mirta, Paulo Souza, Sebastian, Tatiana, Tiago e Vanessa, pela ajuda e parceria em todos os momentos.

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### **INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO NAS PERDAS DE ÁGUA POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO SUL DO BRASIL E URUGUAI**

Autor: Renato Beppler Spohr  
Orientador: Reimar Carlesso  
Santa Maria, 28 de fevereiro de 2007.

Com o objetivo principal de modelar o escoamento superficial para solos com diferentes características físicas a partir de diferentes intensidades de precipitação e duração das chuvas, realizaram-se chuvas simuladas em diferentes solos no Rio Grande do Sul e Uruguai, com intensidade de 30, 60 e 120 mm h<sup>-1</sup>. As chuvas artificiais foram aplicadas utilizando-se um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes. Seis parcelas foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo (0,5m<sup>2</sup>), contendo na parte inferior uma calha coletora, para coletar a água do escoamento superficial (mensurado em intervalos de cinco minutos). Em cada solo foi determinado o tempo de início e a taxa de escoamento superficial, além da chuva (quantidade, duração e intensidade), declividade do terreno, massa seca na superfície e cobertura do solo, densidade (do solo e de partícula), porosidade do solo (macro, micro e total), textura (argila, silte e areia), umidade inicial e de saturação do solo. Utilizou-se o modelo modificado de Smith para estimativa do escoamento superficial. Os parâmetros do modelo foram ajustados através de equações multivariadas. No Uruguai, as perdas acumuladas por escoamento superficial foram de 64, 32, 30 e 15% do total aplicado, para o Vertissolo 1, Chernossolo, Argissolo 2 e Vertissolo 2, respectivamente. No Rio Grande do Sul, as perdas acumuladas por escoamento superficial foram de 67, 45 e 27% do total aplicado, para o Argissolo 1, Neossolo e Latossolo, respectivamente. Na maioria dos casos houve uma redução no tempo de início de escoamento superficial, com o aumento da umidade inicial do solo e da intensidade da chuva, independentemente das condições da superfície do solo. O modelo modificado de Smith estima melhor o escoamento superficial em condições de elevada umidade do solo e o ajuste foi satisfatório para o Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: infiltração de água; teor de argila; compactação do solo

## **ABSTRACT**

Doctorate's Thesis  
Post-Graduation Program on Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **SOILS PHYSICAL CHARACTERISTICS INFLUENCES IN THE RUNOFF IN SOUTH OF BRAZIL AND URUGUAY**

Author: Renato Beppler Spohr  
Advisor: Reimar Carlesso  
Santa Maria, February, 28<sup>th</sup>, 2007.

The objective of this work was to modeling runoff in soils with different physical characteristics, with three simulated rainfall intensities (30, 60 and 120 mm h<sup>-1</sup>) in Rio Grande do Sul and Uruguay. For simulated rainfall was used a portable rainfall simulator of multiple nozzles. Six plots were delimited by metal sheet borders (0,5 m<sup>2</sup>), with a runoff collector in the lower part. The runoff was determinate each five minutes. On each soil was determinate initial time and rate of runoff, rainfall (total, time and intensities), direction of slope, crop residue and cover percentage, soil densities (bulk and particle), soil porosity (bulk, macro and micro), textural fractions (clay, silt and sand), initial and saturated soil moisture. The runoff was estimated with Smith's modified model. The model parameters were adjusted by multivariate equations. The runoff losses accumulated in Uruguay was 64, 32, 30 e 15% from total rain, for Vertissolo 1, Chernossolo, Argissolo 2 e Vertissolo 2, respectively. The runoff losses accumulated in Rio Grande do Sul was 67, 45 and 27% from total rain, for Argissolo 1, Neossolo e Latossolo, respectively. In most of the cases, the initial runoff time decreased with increasing soil moisture and rain intensity, independently of the soil surface conditions. Smith's modified model estimated better the runoff with high soil moisture. The model adjustment was satisfactory for Rio Grande do Sul.

Key-words: water infiltration; clay content; soil compacting

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-** Distribuição geográfica dos locais onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007..... 32
- Figura 2-** Distribuição geográfica dos locais onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007..... 32
- Figura 3-** Detalhe do simulador de chuva estacionário de bicos múltiplos e oscilantes utilizado nas avaliações. Santa Maria, RS, 2007..... 34
- Figura 4-** Detalhe das parcelas, calhas coletoras e pluviômetros utilizados nas avaliações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2007..... 34
- Figura 5-** Intensidade da chuva em função do número de oscilações dos bicos aspersores para calibração do simulador de chuva e o CUC para cada teste. Santa Maria, RS, 2007. .... 35
- Figura 6-** Detalhe de uma fotografia digital e da malha quadriculada utilizada para determinação da porcentagem de cobertura da superfície do solo. Santa Maria, RS, 2007..... 36
- Figura 7-** Detalhe do quadrado utilizado para coleta de massa seca da superfície do solo. Santa Maria, RS, 2007..... 36
- Figura 8-** Detalhe da cobertura do solo após a semeadura da soja, com o uso de sulcadores (a) e do cultivo seguinte após a colheita da aveia (b), quando foram realizadas as avaliações de chuva simulada no Latossolo. Santa Maria, RS, 2007..... 42
- Figura 9-** Curvas características de água no solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten para os diferentes solos testados. Santa Maria, RS, 2007..... 43
- Figura 10-** Detalhe das fissuras no Vertissolo 2 (antes das avaliações com chuva simulada). Santa Maria, RS, 2007..... 46
- Figura 11-** Variação na taxa de escoamento e no escoamento acumulado em função de diferentes valores do expoente “b” do modelo modificado de Smith. Santa Maria, RS, 2007. .... 55

<b>Figura 12-</b> Taxas de escoamento superficial em função das diferentes intensidades de chuva simulada no Uruguai. O valor entre parênteses significa: 1 = chuva 1 e 2 = chuva 2. Santa Maria, RS, 2007. ....	56
<b>Figura 13-</b> Escoamento superficial instantâneo em função das diferentes intensidades de chuva simulada no Rio Grande do Sul. O valor entre parênteses significa: 1 = chuva 1 e 2 = chuva 2. Santa Maria, RS, 2007.....	58
<b>Figura 14-</b> Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Vertissolo 2 e Argissolo 2. Santa Maria, RS, 2007.....	59
<b>Figura 15-</b> Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Chernossolo e Vertissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.....	60
<b>Figura 16-</b> Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Argissolo 1, Latossolo e Neossolo. Santa Maria, RS, 2007. ....	60
<b>Figura 17-</b> Comparação entre os valores observados e estimados para a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.....	74
<b>Figura 18-</b> Comparação entre os valores observados e estimados para a taxa constante escoamento superficial ( $e_c$ ) para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007. ....	74
<b>Figura 19-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do expoente “b” do modelo modificado de Smith para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.....	77
<b>Figura 20-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do expoente “b” do modelo modificado de Smith para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007. ....	77
<b>Figura 21-</b> Relação entre a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) e o tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.....	80
<b>Figura 22-</b> Relação entre a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) e o tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.....	81
<b>Figura 23-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do tempo de início do escoamento superficial para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.....	83
<b>Figura 24-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do tempo de início do escoamento superficial para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007. ....	84
<b>Figura 25-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para o Argissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.....	85

<b>Figura 26-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 no Neossolo e Latossolo. Santa Maria, RS, 2007. ....	86
<b>Figura 27-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Argissolo 2. Santa Maria, RS, 2007.....	89
<b>Figura 28-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Chernossolo. Santa Maria, RS, 2007.....	90
<b>Figura 29-</b> Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Vertissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.....	91
<b>Figura 30-</b> Quantidade de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo e sua relação com a porcentagem de cobertura do solo (adaptado de SILVEIRA & SALVADOR, 2000). Santa Maria, RS, 2007.....	95
<b>Figura 31-</b> Quantidade de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo (MS) e sua relação com a porcentagem de cobertura (adaptado de CARVALHO et al., 1990) e o coeficiente de incremento na taxa de escoamento superficial – Cie (adaptado de SILVA et al., 2001). Santa Maria, RS, 2007. ....	96

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1-** Relação das cidades, locais, solos, convenções utilizadas no texto, coordenadas geográficas e altitudes utilizadas nas avaliações com chuva simulada no Rio Grande do Sul e no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007. .... 31
- Tabela 2-** Valores médios da densidade de partícula e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) nos diferentes solos do Uruguai e do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007..... 41
- Tabela 3-** Valores da umidade residual e de saturação do solo, coeficientes das equações ajustadas ao modelo de van Genuchten para cada curva característica de água nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007..... 44
- Tabela 4-** Valores médios de chuva (intensidade, duração e quantidade), escoamento superficial e declividade do terreno observados nas avaliações realizadas com chuva simulada nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007..... 45
- Tabela 5-** Valores de intensidade da chuva e umidade do solo (antes da chuva e de saturação) nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007..... 48
- Tabela 6-** Valores médios de massa seca de resíduos vegetais, porcentagem de cobertura do solo e declividade do terreno nos diferentes solos testados. Santa Maria, RS, 2007. .... 49
- Tabela 7-** Parâmetros de ajuste do escoamento superficial de água no solo pelo modelo modificado de Smith . Santa Maria, RS, 2007..... 51
- Tabela 8-** Valores máximos, mínimos, desvio padrão e médias das variáveis utilizadas para o conjunto de dados do Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007..... 62
- Tabela 9-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis avaliadas para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007..... 64
- Tabela 10-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007. .... 65
- Tabela 11-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007..... 66

<b>Tabela 12-</b> Equações de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em $\text{mm h}^{-1}$ e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Santa Maria, RS, 2007.....	69
<b>Tabela 13-</b> Equações de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em $\text{mm h}^{-1}$ e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.....	71
<b>Tabela 14-</b> Equações de regressão linear múltipla para estimativa do expoente “b” e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.....	75
<b>Tabela 15-</b> Equações de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) em minutos e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.....	78
<b>Tabela 16-</b> Fator de umidade ( $fu$ ) do solo para diferentes faixas do índice de precipitação antecedente (IPA). Santa Maria, RS, 2007. ....	82

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 Infiltração de água no solo e escoamento superficial .....	16
2.2 Características físicas do solo .....	20
2.3 Sistemas de cultivo e a cobertura do solo com resíduos vegetais.....	24
2.4 Precipitação pluvial efetiva e a eficiência do uso da água.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
4.1 Características físicas do solo .....	41
4.2 Intensidade, duração e quantidade de chuva, declividade do terreno e as perdas de água por escoamento superficial .....	44
4.3 Umidade inicial e de saturação do solo .....	47
4.4 Massa seca de resíduos vegetais e cobertura do solo .....	49
4.5 Tempo de início e a taxa constante de escoamento superficial.....	50
4.6 Taxa de escoamento superficial .....	54
4.7 Coeficiente de escoamento superficial .....	59
4.8 Resumo estatístico das variáveis em estudo.....	61
4.9 Correlações entre variáveis estudadas.....	63
4.10 Estimativa dos parâmetros do modelo modificado de Smith .....	68
4.10.1 Estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ).....	69
4.10.2 Estimativa do expoente “b” .....	73
4.10.3 Estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ).....	76
4.11 Avaliação do modelo modificado de Smith – modelos 1 e 2 para o Rio Grande do Sul .....	84
4.12 Avaliação do modelo modificado de Smith – modelos 3 e 4 para o Uruguai ....	88
4.13 Massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo e o escoamento superficial.....	93
5 CONCLUSÕES.....	98
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade crescente do aumento dos cultivos agrícolas para produção de alimentos, inicialmente conduziu o homem a explorar solos ocupados com pastagens e florestas nativas. As primeiras técnicas de cultivo adotadas causavam um intenso revolvimento do solo, promovendo a sua degradação com a redução do conteúdo de matéria orgânica e destruição dos agregados (tanto pela ação mecânica dos implementos como pelo impacto direto das gotas de chuva sobre o solo descoberto). Conseqüentemente, houve a degradação da estrutura do solo e a redução das taxas de infiltração de água, causando grandes perdas de solo e água por escoamento superficial. Atualmente, a adoção do sistema de plantio direto tem resultado em uma significativa redução das perdas de solo por erosão hídrica.

A manutenção de cobertura de resíduos vegetais sobre a superfície do solo impede o impacto direto das gotas de chuva sobre os agregados do solo, aumenta a tortuosidade do fluxo superficial de água e diminui a velocidade de escoamento, reduzindo os problemas de selamento superficial, desagregação e transporte de partículas do solo. Ao observar os resultados positivos do plantio direto no controle das perdas de solo por erosão hídrica, houve a retirada de muitos terraços de área agrícolas com o objetivo de facilitar as operações com as máquinas agrícolas. Entretanto, em áreas com longos pendentes, a retirada dos terraços provocou um aumento no fluxo de água sobre a superfície do solo. Assim, o plantio direto perdeu eficiência no controle do fluxo superficial de água do solo, causando o aumento das perdas de água por escoamento superficial. Além disso, o tráfego de máquinas pesadas durante as operações agrícolas contribuiu para o aumento da compactação do solo e para a redução das taxas de infiltração, aumentando perdas por escoamento superficial e reduzindo a disponibilidade de água para as plantas.

A precipitação pluvial é a principal fonte de água às culturas e, no Rio Grande do Sul elas são bem distribuídas nas quatro estações do ano (verão: 24%, outono:

25%, inverno: 25% e primavera: 26%) e o volume total é suficiente para atender a demanda da maioria dos cultivos agrícolas. No entanto, a distribuição das precipitações pluviais, principalmente nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) quando a demanda atmosférica é elevada, é geralmente irregular e de alta intensidade, resultando em grandes perdas por escoamento superficial. Segundo a Organização para Agricultura e Alimentação (FAO), as áreas irrigadas nos países em desenvolvimento, devem aumentar dos atuais 202 para 242 milhões de hectares. Assim, a escolha de tecnologia mais adequada e, sobretudo, a promoção de métodos de irrigação que evitem o desperdício é fundamental para atender à demanda por alimentos, com o mínimo de impactos ambientais, como a degradação dos solos e aquíferos (JOHN, 2003). O aumento da disponibilidade de água aos cultivos agrícolas é uma alternativa para incrementar a produção de alimentos em nível mundial, desde que não cause danos ao meio ambiente e seja utilizada de forma racional e eficiente. Uma grande contribuição na preservação dos recursos hídricos é o avanço nos sistemas de manejo da água e do solo que contribuem para o aumento da eficiência do uso da água, visando a melhor utilização da água das precipitações pluviais.

A determinação da precipitação efetiva é de grande relevância no estudo da precipitação com fins de aplicação na agricultura, visto que esta parcela da precipitação pluvial é realmente aquela que estará contribuindo com a água disponível do solo. Assim, a determinação das perdas de água por escoamento superficial pela chuva natural é essencial para o entendimento e quantificação de processos hidrológicos. Estudos confiáveis com chuva natural requerem vários anos de medidas para obter uma amostragem representativa dos eventos de chuva. Além disso, a natureza irregular da chuva natural impede a intensiva coleta de dados durante a ocorrência do evento. Assim, para possibilitar estudo em períodos mais curtos e com maior controle das intensidades de precipitação tem-se utilizado precipitações pluviais artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001).

Esse trabalho teve como objetivo determinar e modelar as perdas de água por escoamento superficial em solos com diferentes características físicas (textura, porosidade e densidade do solo, capacidade de retenção de água, capacidade de infiltração, declividade, porcentagem de cobertura do solo, etc.) a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas no Rio Grande do Sul e no Uruguai.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Infiltração de água no solo e escoamento superficial**

Infiltração é o processo pelo qual a água penetra no solo, através de sua superfície (BERNARDO, 2002). Esse processo ocorre porque a água da chuva ou da irrigação possui um potencial total maior do que aquele verificado para a água do solo (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000). No início da irrigação ou da chuva, a infiltração de água é rápida. Isto ocorre devido ao reduzido potencial total do solo seco e também pela entrada de água pelas rachaduras, canais biológicos e macroporos do solo. À medida que a chuva ou irrigação continua há uma redução na infiltração de água devido o aumento do potencial total da água, que passa a ser igual ao gravitacional, tornando a camada superficial do solo praticamente saturada (DAKER, 1984). De modo geral, a infiltração é um processo desacelerado, isto é, rápido no início e com posterior diminuição gradativa, até atingir certo equilíbrio dinâmico (REICHARDT, 1990). Nessas condições, quando a taxa de infiltração praticamente não varia com o tempo, passa a ser chamada de infiltração básica (BERNARDO, 2002) ou capacidade de infiltração do solo, possuindo o valor da condutividade hidráulica saturada do solo (HILLEL, 1980).

O escoamento superficial, conforme PRUSKI et al. (2003), corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração de água de um solo, inicia o acúmulo superficial de água e, ultrapassada a capacidade de acúmulo de água na superfície do terreno, ocorre o início do escoamento superficial. Para DERPSCH et al. (1991), se toda a água da chuva que atingisse a superfície do solo pudesse infiltrar, não haveria escoamento superficial.

De modo geral, sob uma intensidade constante de chuva, a infiltração e o escoamento superficial são processos antagônicos, a medida que um diminui (infiltração) o outro aumenta (escoamento), até atingirem certo equilíbrio dinâmico (estabilização). Nessas condições, quando a taxa de escoamento superficial praticamente não varia com o tempo, passa a ser chamada de taxa constante de escoamento.

O processo do escoamento superficial inclui uma série de fases intermediárias entre a precipitação pluvial e o escoamento em rios. O ciclo do escoamento pode ser descrito em três fases: (i) após um período sem chuvas, a vegetação e o solo estão com pouca umidade. Os cursos d'água existentes estão sendo alimentados pelo lençol d'água subterrâneo que mantém a vazão de base dos cursos d'água. Quando se inicia uma precipitação pluvial, boa parte da água é interceptada pela vegetação e a parcela da chuva que chega ao solo é infiltrada. Exceto pela parcela de chuva que cai diretamente sobre o curso d'água, não existe nenhuma contribuição para o escoamento nesta fase. Parte da água retida pela vegetação é evaporada; (ii) com a continuidade da precipitação pluvial, a capacidade de retenção da vegetação é esgotada e a água cai sobre o solo. Se a precipitação pluvial persistir, a capacidade de infiltração do solo pode ser excedida e a água começar a se acumular em depressões rasas do terreno, que em seguida se unem formando um filme de água sobre o solo, começando, então, a mover-se como escoamento superficial, na direção de um curso d'água. Se a chuva continuar, o escoamento superficial ocorrerá de forma contínua, na direção de um rio e; (iii) quando a precipitação pluvial pára, o escoamento superficial rapidamente cessa, a evaporação e a infiltração continuam a retirar água da vegetação e de poças na superfície do solo (GRH, 2006).

A precipitação pluvial, com suas duas principais características, intensidade e duração, é um fator climático que apresenta importante influência no deslocamento superficial de água. Quanto maior a intensidade mais facilmente a taxa de infiltração de água no solo é superada, provocando assim o excesso de precipitação pluvial que escoará superficialmente. Quanto à duração da chuva, à medida que esta se prolonga a capacidade de infiltração de água no solo se reduz, favorecendo o escoamento superficial. Segundo MEHL (2000), as características das chuvas ocorridas em uma determinada região determinam em grande parte os efeitos danosos da erosão.

Segundo PRUSKI et al. (2003), todos os fatores que influenciam na infiltração de água no solo interferem também no escoamento superficial resultante. O escoamento superficial tende a crescer com o aumento da intensidade e a duração da precipitação pluvial e da área abrangida. A cobertura e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de infiltração da água no solo, exercem importante influência na interceptação da água advinda da precipitação pluvial. Quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal, a rugosidade da superfície do solo e a evapotranspiração da cultura, maiores serão as taxas de infiltração de água no solo quando ocorrer uma chuva e conseqüentemente menores serão as perdas por escoamento superficial. Em contrapartida, quanto maior for a área e a declividade da bacia hidrográfica, maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial que ocorrerá na seção de deságüe. Além disso, quanto mais circular for a forma da bacia hidrográfica, mais rápida será a concentração do escoamento superficial e conseqüentemente, maior deverá ser a sua vazão máxima. A inclinação do declive do terreno é outro fator que influencia fortemente as perdas de solo e água por erosão hídrica, pois à medida que ela aumenta, maiores serão o volume e a velocidade do escoamento superficial e menor será a infiltração de água no solo. Com isso, aumenta a capacidade de transporte das partículas de solo pela enxurrada, assim como a própria capacidade desta de desagregar solo, por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido da pendente do terreno (COGO et al., 2003).

A infiltração de água no solo é influenciada pelo conteúdo inicial de água do solo, condutividade hidráulica e características da camada superficial do solo, além de ser afetada também pela presença de camadas de baixa permeabilidade e duração da chuva ou irrigação (BERNARDO, 2002; CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000). As principais características físicas que afetam a taxa de infiltração de água no solo são a estrutura, a textura, a porosidade e o tamanho dos poros do solo. Além disso, fendas e rachaduras, presença de ar aprisionado, porcentagem de matéria orgânica e a temperatura do solo e da água também influenciam a infiltração da água no solo (DAKER, 1984). A ocorrência de uma camada de menor permeabilidade de água no perfil do solo limita a capacidade de infiltração do perfil do solo. O perfil do solo apresentará uma capacidade de infiltração igual a permeabilidade da camada limitante. Essa camada de impedimento poderá ser tanto arenosa como argilosa, dependendo da condição inicial de umidade do solo. Uma

camada argilosa limita a infiltração em condições de saturação do solo enquanto uma camada arenosa limita a infiltração em condições não saturadas do perfil (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000).

O manejo do solo altera a taxa de infiltração de água e o escoamento superficial. Solos sob plantio direto apresentam um aumento da taxa de infiltração de água, quando comparado ao preparo convencional. Isso ocorre devido a presença no sistema plantio direto, de uma rede de macroporos contínuos em profundidade (SILVA, 2003; BARCELOS et al., 1999). BARCELOS et al. (1999) verificaram que no preparo convencional, a taxa de infiltração de água foi 18% inferior àquela observada no sistema plantio direto, tendo como conseqüências um maior escoamento superficial, e maiores riscos de perda de solo e nutrientes por erosão. Além disso, as perdas de água por evaporação e escoamento superficial são menores no plantio direto, devido a presença da camada de resíduos vegetais formando uma barreira isolante (SALTON & MIELNICZUK, 1995).

Por outro lado, KERTZMANN (1996) verificou que sob sistema plantio direto, o solo apresenta redução da taxa de infiltração quando comparado a condição natural do mesmo. Isso, segundo ZIMMERMANN (2001), pode estar relacionado a influências negativas das propriedades físicas do solo neste sistema de plantio, aumentando assim a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração de raízes, e diminuindo a infiltração de água no solo.

A compactação do solo limita a infiltração de água, ocasionando erosão ou empoçamento da água na superfície do solo (SILVA, 2003). De acordo com REINERT et al. (2001), a textura do solo é uma característica pouco variável no tempo e pouco afetada pelo manejo. Dessa forma, as modificações físicas dos solos são associadas à sua estrutura. Ainda, segundo os autores, em sistemas irrigados de produção agropecuária, parte das limitações impostas pela degradação da estrutura dos solos associados ao uso agrícola, podem ser aliviadas pelo manejo do conteúdo de água do solo. Por outro lado, o manejo inadequado da água pode gerar limitações de falta de ar para as plantas pela aplicação de água em excesso, ou acelerar a compactação do solo pelo intenso tráfego de máquinas, em solos úmidos, devido a maior susceptibilidade dos mesmos à compactação.

Segundo REICHARDT (1990), são vários os problemas causados pelo escoamento superficial, pois trata-se de uma quantidade de água perdida pelo local que a recebeu, pois esta infiltrará em outro local ou será perdida em cursos d'água.

O arraste de partículas de solo juntamente com o escoamento superficial causa a erosão hídrica, que dependendo da velocidade da água, poderá levar até dezenas de toneladas de solo por hectare. Se a erosão seguir caminhos preferenciais surgirão as vossorocas. As fendas abertas podem chegar até vários metros de profundidade e de largura. Para MORAIS & COGO (2001), o controle do escoamento superficial tem importantes implicações tanto na questão ambiental, evitando o carreamento de poluentes, como fertilizantes, agrotóxicos e sedimentos, quanto no controle da erosão hídrica, pois a água concentrada pode adquirir energia erosiva, aumentando as perdas de solo. GARCIA (2005) consideram a erosão hídrica um dos principais problemas causados pela má gestão dos recursos hídricos. Com a erosão são transportados sedimentos e agroquímicos causando a poluição dos mananciais, disseminação de doenças por veiculação hídrica, assoreamento dos cursos d'água, perda da camada fértil do solo e de sementes.

## **2.2 Características físicas do solo**

A compactação da superfície do solo pode resultar de processos físicos naturais ou do cessamento das operações de seu preparo, como acontece quando se adota a semeadura direta, por exemplo. A compactação aumenta a coesão entre as partículas de solo, tornando-o mais compacto e resistente à desagregação, pela ação tanto de impacto das gotas da chuva quanto de cisalhamento do escoamento superficial. Isto diminuirá as perdas de solo, mesmo na ausência de resíduo cultural e de rugosidade superficial. Por outro lado, elevada compactação e mínima rugosidade superficial do solo reduzem a infiltração de água da chuva e aumentam o escoamento superficial e, com isto, a perda de água da lavoura (Dissmeyer & Foster (1981), citados por VOLK, 2004). Dentre as condições físicas de subsuperfície do solo que influem na erosão, destacam-se aquelas que determinam a qualidade da estrutura e do espaço poroso do solo. A estrutura do solo é mais bem caracterizada por uma combinação de características e propriedades físicas do solo, não existindo uma variável simples que a represente adequadamente em termos quantitativos (VOLK et al., 2004). A estabilidade e a distribuição relativa de tamanho de agregados e de poros do solo são variáveis que servem para indiretamente avaliar a

qualidade de sua estrutura (KIEHL, 1979). A estrutura tem efeito pronunciado na retenção, infiltração e armazenamento de água, na permeabilidade e erodibilidade do solo e na erosão hídrica. Em geral, um solo com estrutura de boa qualidade apresenta boa capacidade de retenção, infiltração, permeabilidade e armazenamento de água no seu interior, o que no conjunto irá refletir-se em menor escoamento superficial e erodibilidade do solo (VOLK et al., 2004).

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais. Para a pedologia, a compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes do solo. Em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor e isto tem sido atribuído ao impedimento mecânico ao crescimento radicular, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas (VIEIRA & MUZILLI, 1984; TORMENA et al., 1998; MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999; GUIMARÃES et al., 2002). A compactação do solo pode ter efeitos benéficos ou adversos. Os efeitos benéficos têm sido atribuídos à melhoria do contato solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos. Por outro lado, a compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento das perdas de água por escoamento superficial e problemas de erosão e de potência necessária para o preparo do solo (RICHART et al., 2005).

A extensão e a intensidade da compactação do solo vão depender da pressão exercida pelos pontos de apoio das máquinas e equipamentos, das suas cargas, do número de vezes que trafegam no terreno, da textura e da agregação do solo. Assim, o tráfego de máquinas e equipamentos de grande porte sobre a área de cultivo pode alterar sensivelmente as características físicas do solo, principalmente quando estes estão saturados, ocasionando a formação de camadas compactadas, tanto em superfície como em subsuperfície. As principais modificações nas propriedades físicas do solo que podem ocorrer são desde aumento na densidade do solo, aumento da resistência do solo à penetração das raízes, redução da macroporosidade com conseqüente redução da condutividade e do acúmulo de

água, comprometendo desta forma a infiltração de água e a penetração das raízes no perfil do solo, o qual se torna mais suscetível à erosão.

No sistema plantio direto, em geral, os solos apresentam após três a quatro anos, maiores valores de densidade do solo e microporosidade na camada superficial, e menores valores de macroporosidade e porosidade total, quando comparado com o preparo convencional. Isto ocorre, sobretudo pelo arranjo natural do solo não mobilizado, e pela pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, em particular quando realizado em solos argilosos e com teores elevados de umidade (SILVEIRA & STONE, 2003).

A porosidade do solo é uma propriedade física do solo que sofre grandes alterações com a compactação. Pesquisas realizadas em várias regiões apontam alterações significativas com a compactação no decréscimo da porosidade, da continuidade do número e tamanho dos poros e da difusão de gases, com reduções significativas principalmente no volume dos macroporos (HILLEL, 1980). Com relação a distribuição e tamanho dos poros, a microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo, enquanto que a macroporosidade influencia diretamente a capacidade de infiltração, a drenabilidade do solo e sua capacidade de aeração (HILLEL, 1998). Existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular. VOMOCIL & FLOCKER (1966) sugerem um espaço aéreo mínimo do solo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para o crescimento e o desenvolvimento satisfatórios das plantas. ABREU (2000) afirma que poros formados pela ação das raízes no solo são mais estáveis, pois a decomposição por microrganismos gera materiais que atuam como cimentantes nas paredes dos poros, proporcionando maior durabilidade, se comparados àqueles formados por implementos mecânicos.

O espaço poroso de um solo é determinado principalmente por sua textura e estrutura. A quantidade e a natureza dos poros existentes variam de acordo com o arranjo ou a geometria das partículas sólidas. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura e outras características. Em solos arenosos ou subsolos compactos, onde há a tendência das partículas permanecerem em contato íntimo, a porosidade total é reduzida. No caso de solos de textura média, onde é comum a ocorrência de agregados porosos e elevado teor

de matéria orgânica, os espaços porosos por unidade de volume são elevados (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000).

A estrutura do solo pode ser definida como sendo o arranjo das partículas, ou seja, das frações argila, silte e areia. Na avaliação da estrutura do solo, o fator primordial a ser considerado diz respeito à estabilidade dos agregados, a qual é dependente das forças que ligam as partículas e também, da natureza e magnitude das forças desagregantes aplicadas nesta avaliação. Os diferentes sistemas de manejo de solos têm por finalidade criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Todavia, o desrespeito às condições mais favoráveis para o preparo do solo e o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações pode levar a modificações na estrutura do solo, causando-lhe maior ou menor compactação, que poderá interferir na infiltração de água no solo, na condutividade hidráulica do solo saturado e no desenvolvimento radicular das culturas e, conseqüentemente, reduzir sua produtividade (DE MARIA et al., 1999).

SALES et al, (1999) citam que é recomendável que a velocidade de infiltração de água no solo seja determinada *in situ*. Porém nos resultados observados ocorrem normalmente uma grande variabilidade nos valores de velocidade de infiltração básica, devido a variabilidade espacial e a heterogeneidade dos solos. Assim, o autor procurou associar os valores de velocidade de infiltração básica do solo com algumas características físicas de um Latossolo Roxo e um Podzólico Vermelho-Amarelo, ambos de textura argilosa. A condutividade hidráulica, a densidade do solo, a porosidade total e a microporosidade foram as características físicas que se correlacionaram significativamente e poderiam ser utilizadas para estimar a infiltração de água nesses solos. REICHERT et al. (1992), utilizando sete diferentes solos submetidos a duas séries de chuvas simuladas de  $85 \text{ mm h}^{-1}$ , correlacionaram as frações texturais do solo com o tempo de início de escoamento superficial e com a taxa de infiltração constante do solo. A partir desses resultados determinaram-se equações de regressão linear múltipla com o objetivo de prever a taxa de infiltração de água no solo a partir das frações texturais do solo descoberto.

### 2.3 Sistemas de cultivo e a cobertura do solo com resíduos vegetais

Segundo DENARDIN & KOCHHANN (1997), as mobilizações intensivas do solo, principalmente no sistema convencional, sob condições inadequadas de umidade e de cobertura vegetal, modificam adversamente a estrutura do solo, afetando basicamente as relações entre as fases sólida, líquida e gasosa. Desta forma, transformam a camada arável que passa a ter a camada superficial pulverizada e a subsuperficial compactada. No sistema de preparo convencional do solo a grade aradora tem sido o equipamento mais utilizado. Normalmente a grade trabalha o solo a pouca profundidade e apresenta alto rendimento de trabalho, porém o uso contínuo desse implemento pode levar à formação de camadas compactadas, chamadas “pé-de-grade”. Os arados, tanto de disco como de aiveca são equipamentos hoje pouco utilizados, porque requerem maior tempo e energia para a sua operação. Segundo Voorhees (1979), citado por RICHART et al. (2005), o sistema de preparo convencional do solo ocasiona compactação subsuperficial em virtude da mobilização e descompactação mecânica da camada mobilizada, ao mesmo tempo em que a carga aplicada apresenta efeito acumulativo em subsuperfície ao longo dos anos.

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo tem sido apresentada como uma opção para assegurar a sustentabilidade do uso agrícola dos solos, pois a utilização de práticas de manejo que mantém a proteção do solo através do contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para a manutenção da estrutura do solo (SILVA et al., 2000). A percentagem de cobertura do solo proporcionada pelas restevas das culturas é fator fundamental na redução das perdas de solo por erosão hídrica, obtendo-se boa eficácia já com 30% de cobertura (LOPES et al., 1987). A cobertura do solo tem sido utilizada para amortecer o impacto das gotas de chuva e reduzir a velocidade do escoamento superficial, visando a minimização das perdas de água e solo. Como o clima (principalmente a precipitação pluvial), o solo (resistência à dispersão e sua taxa de infiltração de água) e a topografia não podem ser modificados, a cobertura do solo assume um importante papel no controle da erosão provocada pela chuva (WILDNER, 1985). Segundo PRUSKI (1997), quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo contra a ação da chuva, tanto menor será a propensão de ocorrência de erosão nesse solo. Além de aumentar a quantidade de água

interceptada, a vegetação amortece a energia do impacto das gotas de chuva reduzindo a desagregação dos agregados, a obstrução dos poros e o selamento superficial do solo. A presença de cobertura vegetal na superfície do solo também promove a redução da velocidade do escoamento superficial devido ao aumento da rugosidade hidráulica do percurso ao longo do qual ocorre o escoamento.

Segundo SCHAEFER et al. (2002), com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, ocorre a quebra mecânica dos agregados, resultando na formação de uma camada adensada na superfície do solo, o selamento superficial. A formação do selamento superficial deve-se a dois mecanismos: (i) fragmentação física dos agregados do solo e seu adensamento e; (ii) dispersão físico-química e migração das partículas de argila para a região de 0,1 a 0,5 mm de profundidade, onde se alojam, obstruindo os poros. O primeiro mecanismo predomina e é determinado pela energia cinética das gotas. O segundo, é controlado principalmente pela concentração e composição de cátions no solo e pela aplicação de água. Os dois mecanismos atuam simultaneamente e o primeiro incrementa o segundo. Embora o selamento superficial seja uma camada compactada de pequena espessura, ocasiona mudanças na taxa de infiltração de água no solo e, também, funciona como impedimento a emergência das plantas. Lal (1974), citado por RICHART et al. (2005), verificou redução de 40 e 73% na infiltração acumulada, respectivamente em uma área cultivada com milho por um ano, e em outra preparada e sem cobertura, mantida pelo mesmo período, comparadas com uma área sob floresta. Segundo o autor, as diferenças foram devidas às alterações na estrutura, sobretudo na superfície; pelo selamento ocasionado pela energia cinética das gotas de chuva.

O tempo de início de escoamento superficial evidencia o efeito das condições superficiais do solo no retardamento do escoamento, enquanto a taxa constante expressa o excedente da água da chuva por unidade de tempo (a porção que não mais infiltra no solo após sua saturação). Assim, quanto maior o tempo de início e menor a taxa constante de escoamento superficial, maior será a quantidade de água que infiltrará ou ficará retida na superfície do solo e menor será a perda total da mesma. VOLK et al. (2004) observaram que os valores médios de tempo de início e de taxa constante de escoamento superficial variaram expressivamente entre o plantio direto e o convencional. O preparo convencional, por apresentar superfície de solo rugosa e não consolidada, possibilitou maior infiltração de água e reteve por

mais tempo a enxurrada nas suas microdepressões. Isto resultou em maiores tempos de início e em menores taxas constantes de escoamento superficial quando comparado a semeadura direta. A maior consolidação e densidade do solo dificultaram a infiltração de água e favoreceram o escoamento superficial. Em termos práticos, isto indica que o plantio direto, principalmente com pouca massa de resíduo cultural sobre a superfície e com camadas de solo mais compactadas, necessita de especial atenção para reduzir as perdas de água por erosão hídrica.

Elevados valores de densidade do solo e reduzidos valores de macroporosidade em solos sob plantio direto levam a pensar que a infiltração neste sistema de preparo deva ser menor que no preparo convencional, onde a superfície normalmente é menos compacta. Mas num processo de precipitação pluviométrica, variáveis como a resistência do solo à desagregação pelo impacto das gotas e a cobertura com restos vegetais, passam a desempenhar papel importante sobre a quantidade de água que penetra no solo por unidade de tempo. Por isso, quando se avalia a infiltração de água em trabalhos de manejo do solo é muito importante considerar o método de avaliação (anéis concêntricos ou chuva simulada). Quando se trabalha com anéis concêntricos, se estabelece uma carga hidráulica constante sobre a superfície do solo, eliminando-se o efeito de proteção contra o poder desagregante das gotas de chuva da cobertura morta. Com isso, os valores de infiltração básica são muito semelhantes, mesmo quando se compara sistemas tão distintos como plantio direto e preparo convencional. As avaliações com chuva simulada refletem melhor as condições de infiltrabilidade da água no solo, pois não eliminam aqueles fatores considerados anteriormente (CASTRO, 1995).

COGO et al. (2003), trabalhando com diferentes sistemas conservacionistas de manejo do solo e três diferentes classes de declividade do terreno, observaram que após as operações de preparo do solo e ou de semeadura, a massa seca de resíduos culturais remanescente na superfície do solo e sua equivalente percentagem de cobertura foram reduzidas, em média, em 93, 76 e 17%, respectivamente nos preparos convencional, reduzido e semeadura direta, em relação aos valores existentes antes de tais operações, independentemente do tipo de resíduo cultural. Tais reduções podem ser explicadas pela atuação diferenciada dos instrumentos de preparo utilizados. As perdas de água foram todas muito baixas e similares, mas tendendo a serem maiores no preparo convencional, intermediárias na semeadura direta e menores no preparo reduzido. As diferenças nas perdas de

água foram pequenas dentro de uma mesma classe de declividade, mas mostraram tendência de serem um pouco maiores no preparo convencional e um pouco menores no preparo reduzido, ficando a semeadura direta em posição intermediária.

CARVALHO et al. (1990) avaliaram a eficácia de oito doses de massa seca na superfície do solo (0, 0,5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 Mg ha<sup>-1</sup>) e cinco formas de manejo (uniformemente distribuído sobre a superfície, semi-incorporado ao solo por uma, duas e quatro gradagens e totalmente incorporado ao solo com aração + gradagem) do resíduo vegetal de trigo na redução da erosão de solo e água, sob chuva simulada de 64 mm h<sup>-1</sup>. Os autores relatam que as operações de preparo do solo provocam a redução na porcentagem de cobertura do solo (principalmente nas menores quantidades de resíduo), causando uma redução no tempo de início e aumentando a velocidade de escoamento superficial.

FONSECA & CASSOL (2002) avaliaram efeito do plantio direto e convencional sobre as taxas de escoamento superficial em duas séries de chuvas simuladas de 60 e 120 mm h<sup>-1</sup>, durante 180 e 30 minutos, respectivamente. Num ensaio realizado com chuva simulada, oito dias após a semeadura, o plantio direto e o convencional apresentaram uma cobertura do solo de 92 e 59%, respectivamente e as perdas de água por escoamento superficial foram 22% maiores no plantio convencional.

SILVA & KATO (1997) avaliaram o efeito de três sistemas de manejo do solo (cultivo convencional, plantio direto e cerrado virgem) sob cinco tempos de chuva simulada (0, 2, 5, 10 e 20 minutos) sobre a formação do selo superficial e a condutividade hidráulica saturada em um Latossolo Vermelho-amarelo de cerrado. Os autores observaram que o solo de cerrado virgem possui uma maior resistência a formação do selo superficial e conseqüentemente uma maior condutividade hidráulica saturada quando comprado aos solos de áreas cultivadas. E ainda, o manejo convencional do solo é mais susceptível ao selamento superficial que solos mantidos sob plantio direto.

SILVA et al. (2005) trabalhando com de seis porcentagens de cobertura (0, 20, 40, 60, 80 e 100), quatro intensidades (60, 80, 100 e 120 mm h<sup>-1</sup>) e quatro durações de chuva simulada (68, 40, 24 e 14 minutos),- observaram que o aumento da porcentagem de cobertura do solo, para as intensidades de precipitação utilizadas, diminui as perdas de água por escoamento superficial. Além disso, as perdas de água por escoamento superficial aumentam com o incremento da

intensidade de chuva e com a diminuição na porcentagem de cobertura do solo. BRAIDA (1994), utilizando simulador de chuva em um Argissolo Vermelho-Escuro, observou que a erosão entressulcos decresceu exponencialmente com o aumento da cobertura do solo por resíduos vegetais. As parcelas com cerca de 100% de cobertura apresentaram redução de 92% na erosão entressulcos, em relação ao solo descoberto.

LOMBARDI NETO et al. (1988) quantificaram o efeito de 0, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 4000 e 8000 Kg ha<sup>-1</sup> de massa seca de resíduos de milho sobre as perdas de água e solo de um Latossolo roxo distrófico. Os autores concluíram que o aumento da quantidade de resíduos diminuiu acentuadamente as perdas de água e solo nos primeiros níveis de cobertura, o de 2000 Kg ha<sup>-1</sup> reduziu em 50% as perdas de solo e em 40% as de água, em relação ao tratamento descoberto (sem resíduo). Os autores justificam que a cobertura de resíduos vegetais tem menor efeito sobre o fluxo de água, no entanto, diminui o volume e a velocidade do escoamento superficial devido ao menor selamento superficial e ao aumento da rugosidade do terreno, aumentando a infiltração e diminuindo as perdas de água.

#### **2.4 Precipitação pluvial efetiva e a eficiência do uso da água**

A precipitação pluvial efetiva ou aproveitável é um dos elementos básicos a ser considerado na equação do balanço hídrico para determinar os requerimentos de irrigação das culturas, ocupando um papel fundamental no planejamento da irrigação, no uso eficiente dos recursos hídricos e no dimensionamento das obras e dos sistemas de irrigação (ROMERO & GRANÃ, 1999). Segundo SILVA et al. (1994), em um manejo adequado da irrigação, a quantidade de água a ser aplicada à cultura é a diferença entre a demanda da evapotranspiração e a precipitação pluvial efetiva.

A determinação da precipitação pluvial efetiva apresenta grande relevância no estudo da precipitação pluvial com fins de aplicação na agricultura, visto que esta parcela da precipitação pluvial é realmente aquela que estará contribuindo com a água disponível do solo. Em consequência, sua quantificação é de grande utilidade nas irrigações suplementares, levando o irrigante a alcançar expressiva economia na condução da irrigação (SAMPAIO, 2000; SEGUÍ et al., 1995). Conforme DASTANE (1974), apesar de haver um grande volume de dados sobre o clima, não se conhece

o necessário sobre as precipitações pluviais. Alguns conceitos simples são confundidos pelos técnicos da área, como o conceito de precipitação pluvial efetiva que, no seu sentido mais amplo, significa a precipitação pluvial útil ou utilizável; entretanto, este conceito varia bastante, de acordo com a área de interesse.

Na área de produção agrícola, a precipitação pluvial efetiva foi definida primeiramente por DASTANE (1974), como sendo a precipitação pluvial total menos o escoamento e evaporação; depois, HERSHFIELD (1964) definiu que esta seria a diferença entre a precipitação pluvial total menos as perdas por escoamento superficial e percolação profunda. DASTANE (1974) cita uma definição mais moderna que aponta as necessidades de água no preparo do solo e lixiviação de sais sendo, deste modo, a precipitação pluvial total menos as perdas por escoamento superficial e percolação profunda e a variação de umidade no solo.

Vários fatores influem na porção efetiva da precipitação pluvial total, os quais podem atuar isoladamente ou interagindo com outros. Qualquer fator que afete a infiltração, o escoamento superficial ou a evapotranspiração, tem influência no valor da precipitação pluvial efetiva. SEGUÍ et al. (1995) citam que os fatores determinantes na precipitação pluvial efetiva são os relacionados a chuva (quantidade, freqüência e intensidade), as propriedades físicas e a umidade antecedente no solo; a declividade, a cobertura vegetal e a profundidade do sistema radicular.

No Brasil, os projetos de irrigação são geralmente dimensionados em termos de irrigação total, visando cobrir as necessidades hídricas da planta, não se considerando a contribuição da precipitação pluvial. Nota-se que nos projetos se utiliza a necessidade de água máxima da cultura para seu dimensionamento e, para fins de manejo, a tendência atual é viabilizar o aproveitamento das precipitações, com a inclusão da chuva efetiva como água disponível às plantas reduzindo, assim, os custos de operação e manutenção do sistema (SAMPAIO, 2000).

A eficiência do uso da água de cultivos irrigados pode ser aumentada através do manejo da cultura, pelo aumento da fração transpiração na evapotranspiração da cultura, através de práticas culturais como o controle de invasoras, época de colheita, freqüência de irrigação, redução da evaporação direta da água do solo e escoamento superficial. Além disso outros aspectos também influenciam e segundo MENEGETI (2002), um sistema de irrigação deve atender três premissas para ser eficiente no uso da água: i) os equipamentos devem ser fabricados dentro de

padrões e normas e com qualidade reconhecida; ii) os equipamentos devem ser projetados por profissionais competentes com capacidade de planejar e dimensionar corretamente os sistemas para atender as necessidades da cultura a ser explorada e; iii) o equipamento deve ser operado de forma adequada, adotando um manejo correto para a cultura a ser explorada.

Os ecossistemas são vistos como um conjunto de elementos bióticos e abióticos que interrelacionam-se no espaço e no tempo, transformam a matéria e a energia disponível no ambiente através dos processos fundamentais, nos quais a água desempenha um papel muito importante. A maneira de se avaliar a eficiência do uso da água é através da produção de massa seca. A eficiência de uso da água pode ser definida como a razão entre a produção de massa seca e a quantidade de água consumida por uma determinada cultura. O genótipo da planta e a disponibilidade de radiação solar devem ser levados em consideração para a maximização da eficiência de uso da água. No entanto, a disponibilidade de água isoladamente, é o maior limitador da produção das culturas (ROSA et al., 2000). WALLACE & BATCHELOR (1997), sugerem algumas formas para melhorar a agricultura irrigada e não irrigada, e entre elas pode-se salientar o melhor aproveitamento das precipitações pluviais e redução das perdas através de práticas conservacionistas como o plantio direto e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo. Assim, o manejo adequado da água tem um papel fundamental no incremento da produção agrícola, além de melhorar a eficiência do seu uso, aumentando a disponibilidade para outras atividades.

A eficiência da irrigação ou eficiência do uso da água pode ser definida, em termos econômicos, como o retorno econômico em termos de produtividade com a adoção da irrigação. A eficiência do uso da água, em termos fisiológicos, representa a quantidade de massa seca produzida por unidade de volume de água absorvida pelas plantas. Como em algumas regiões a transpiração representa mais de 99% da água absorvida pelas plantas, tem-se utilizado o termo razão de transpiração no lugar do termo eficiência do uso da água. Desta forma a razão de transpiração representa a relação entre a quantidade de água transpirada pela quantidade de massa seca produzida. Esta razão pode ser elevada, podendo até atingir valores de 500 a 1000mm em estações secas associadas com elevada demanda evaporativa da atmosfera (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em três locais no Rio Grande do Sul (Tabela 1 e Figura 1) e no Uruguai foi conduzido em quatro locais nas áreas experimentais do Instituto Nacional de Investigación Agropecuária – INIA (Tabela 1 e Figura 2). O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, bifatorial, com seis repetições, onde o fator A foi constituído de três intensidades de chuva simulada, 30, 60 e 120 mm h<sup>-1</sup> e o fator D foi constituído de duas chuvas simuladas (a segunda chuva era realizada no mesmo local, 24 horas após a primeira).

**Tabela 1-** Relação das cidades, locais, solos, convenções utilizadas no texto, coordenadas geográficas e altitudes utilizadas nas avaliações com chuva simulada no Rio Grande do Sul e no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Cidade	Local	Solo <sup>1</sup>	Denominação utilizada	Latitude S	Longitude W	Altitude
<b>Rio Grande do Sul</b>						
Santa Maria	UFSM	Argissolo Vermelho distrófico arênico	Argissolo 1	29°43'10"	53°43'04"	101m
Santo Augusto	Agropecuária Zamboni LTDA	Latossolo Vermelho distroférico típico	Latossolo	27°52'56"	53°45'42"	538m
São Francisco de Assis	Agroantoniuzzi	Neossolo Quartzarênico órtico típico	Neossolo	29°36'10"	55°19'10"	135m
<b>Uruguai</b>						
Tacuarembó	La Magnolia	Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto	Argissolo 2	31°42'34"	55°49'26"	158m
Treinta y Tres	Palo a Pique	Chernossolo Ebânico órtico típico	Chernossolo	33°15'50"	54°29'42"	67m
Colonia	La Estanzuela	Vertissolo Ebânico órtico típico	Vertissolo 1	34°20'33"	57°43'23"	82m
Salto	El Junco	Vertissolo Ebânico órtico típico	Vertissolo 2	31°11'15"	57°22'23"	80m

<sup>1</sup> Fonte: STRECK et al. (2002)



**Figura 1-** Distribuição geográfica dos locais onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 2-** Distribuição geográfica dos locais onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

As chuvas simuladas foram aplicadas utilizando-se um simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes (Figura 3) desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA – ARS, USA (NORTON & BROWN, 1992). O simulador foi instalado a 2,45 metros acima da superfície do solo e a pressão de saída da água dos bicos foi mantida em 41,4 kPa. A precipitação pluvial total foi determinada, para cada chuva simulada, através de pluviômetros instalados na superfície do solo, ao lado das calhas coletoras (Figura 4).

A calibração do simulador de chuva foi realizada coletando-se a precipitação pluvial em diferentes intensidades de chuvas. A intensidade da chuva foi controlada pela variação do número de oscilações dos bicos aspersores por unidade de tempo. Utilizou-se 31 coletores dispostos longitudinalmente ao simulador de chuvas, espaçados em 0,25m. Testou-se de 10 a 250 oscilações por minutos. A curva de calibração e os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) para cada teste são apresentados na figura 5. O CUC variou de 79 a 92%, sendo que os menores valores foram observados nas menores intensidades. Nas intensidades utilizadas nas avaliações de chuva simulada a campo, 30, 60 e 120 mm h<sup>-1</sup>, os valores de CUC foram de 87, 90 e 91%, respectivamente.

Para cada aplicação de chuva simulada, seis parcelas foram delimitadas por chapas metálicas galvanizadas cravadas no solo, contendo na parte inferior uma calha coletora, para coletar a água de escoamento superficial (Figura 4). As dimensões das parcelas foram de 1,0 x 0,5m (0,5m<sup>2</sup>).

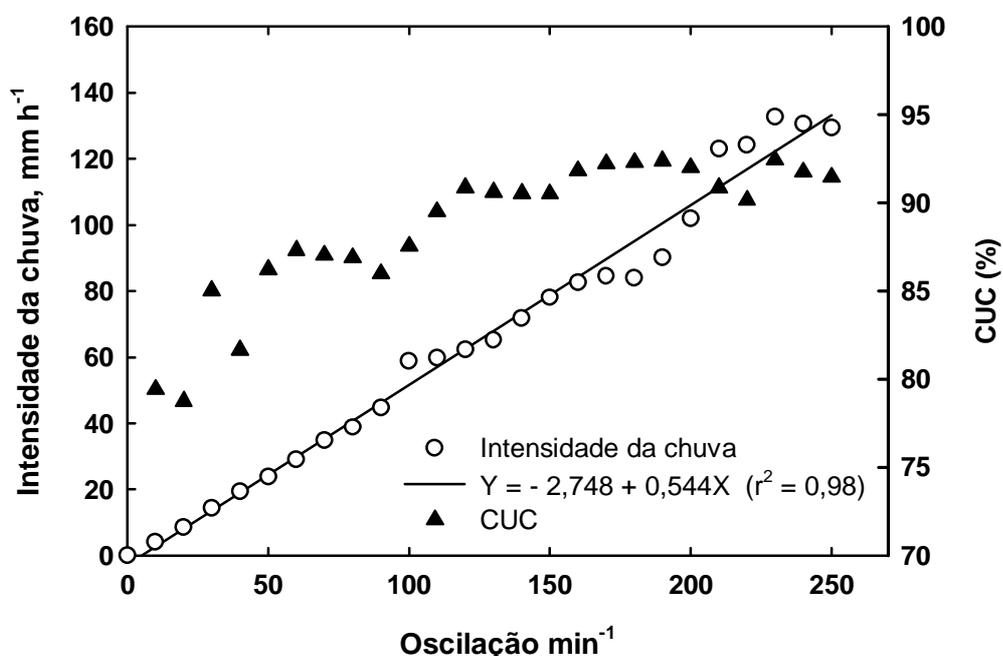
O tempo do início de escoamento superficial foi determinado quando um filete contínuo de água começou a escoar na calha coletora e a superfície apresentou encharcamento. Durante as avaliações, as coletas dos volumes de água escoados eram realizadas em intervalos de cinco minutos. O volume de escoamento superficial foi avaliado até tornar-se constante ou até o tempo máximo de 120 minutos, para cada chuva simulada. A declividade dos locais foi determinada em cada ensaio, com a utilização de um nível de mangueira conforme metodologia descrita por MARQUES (1978).



**Figura 3-** Detalhe do simulador de chuva estacionário de bicos múltiplos e oscilantes utilizado nas avaliações. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 4-** Detalhe das parcelas, calhas coletoras e pluviômetros utilizados nas avaliações das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2007.

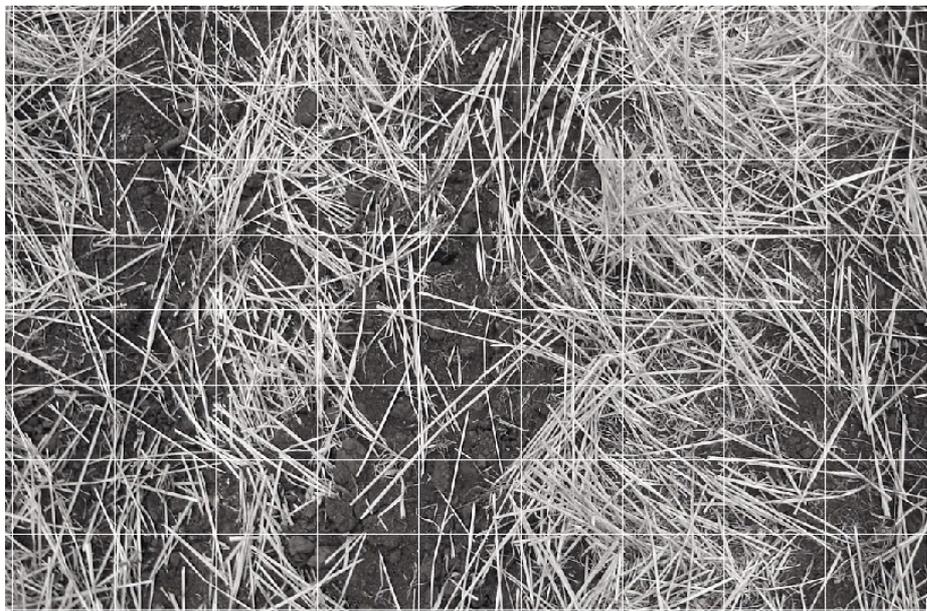


**Figura 5-** Intensidade da chuva em função do número de oscilações dos bicos aspersores para calibração do simulador de chuva e o CUC para cada teste. Santa Maria, RS, 2007.

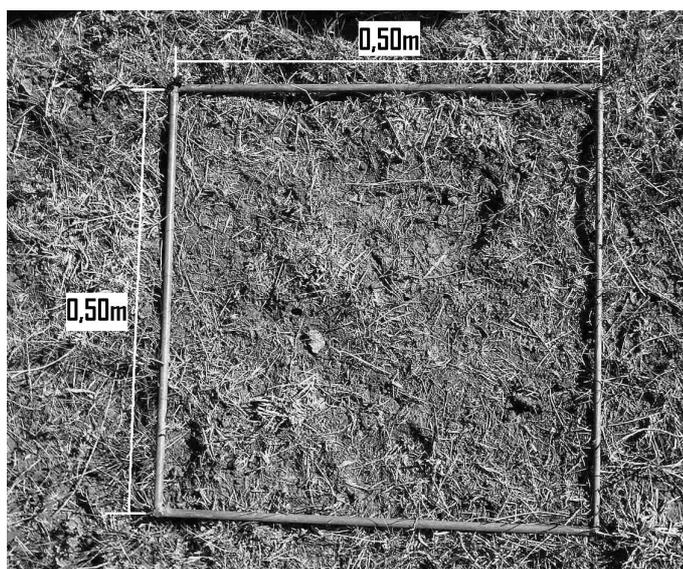
A porcentagem de cobertura do solo com resíduo vegetal foi determinada pelo método da contagem de pontos quadrados (MANNERING & MEYER, 1963), em uma malha de 72 quadriculas, a partir de fotografias digitais, contando-se o número de pontos com cobertura em relação aos pontos sem cobertura e, a partir disso, calculado-se a porcentagem de cobertura (Figura 6). A massa seca de resíduo vegetal na superfície do solo foi determinada através da coleta (em três locais determinados aleatoriamente), secagem (em estufa a 65°C até obter-se massa constante) e pesagem do resíduo vegetal contido em uma área de 0,25 m<sup>2</sup> (Figura 7).

A umidade inicial do solo, antes de cada chuva simulada, foi determinada a partir da coleta de amostras deformadas da camada superficial do solo (0 a 10 cm). A determinação da umidade gravimétrica foi realizada utilizando-se metodologia descrita em BERNARDO (2002).

Em uma área adjacente ao local onde o simulador foi instalado, foram coletadas amostras de solo, com estrutura indeformada na camada de 0 a 10 cm



**Figura 6-** Detalhe de uma fotografia digital e da malha quadriculada utilizada para determinação da porcentagem de cobertura da superfície do solo. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 7-** Detalhe do quadrado utilizado para coleta de massa seca da superfície do solo. Santa Maria, RS, 2007.

para determinações em laboratório da porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo. Para as análises de textura do solo e densidade de partículas foram coletadas amostras com estrutura deformada, na camada descrita acima.

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Análises Físicas do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (Brasil) e no Laboratório de Física de Solos do INIA Las Brujas (Uruguai). As determinações analíticas de textura, densidade de partículas, densidade do solo e distribuição do tamanho de poros foram realizadas conforme métodos descritos em EMBRAPA (1979). Para a análise granulométrica foi utilizado o método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, utilizando um cilindro de metal de 65 cm<sup>3</sup> de volume.

Para determinação da curva característica de água no solo, as amostras de solo foram saturadas e colocadas na mesa de tensão à -0,001, -0,006 e -0,01 MPa por um período de 96 horas em cada tensão. As umidades correspondentes ao ponto de saturação e à tensão de -0,006 MPa foram utilizadas como correspondentes à porosidade total e à microporosidade desse solo, respectivamente. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

As amostras de solo ainda com estrutura preservada, seguiram para o aparelho extrator de umidade idealizado por Richards (RICHARDS, 1949), onde foi obtida a umidade do solo no potencial de -0,10 MPa, nas placas porosas de Richards. Após isso, as amostras foram colocadas na estufa à 105°C para secagem até massa constante.

A umidade das amostras de solo nos potenciais de -0,5 e -1,5 MPa foram determinadas através de psicrometria, utilizando a câmara de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 “dewpoint potentiometer” (DECAGON, 2002). Para essa avaliação foram utilizados cinco sub-amostras de solo com estrutura deformada as quais foram secas ao ar, umedecidas com água através de um borrifador, pesadas e levadas ao WP4, onde foi feita a leitura do potencial que a amostra se encontrava. Após isso as amostras foram levadas para a estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens corresponde ao conteúdo de água do solo no potencial determinado pelo WP4. Relacionando-se o potencial

determinado pelo WP4 para cada sub-amostra com sua respectiva umidade, foi traçado uma curva, com escala logarítmica, da qual foi determinado os valores de umidade do solo nos potenciais de -0,5 e -1,5 MPa.

As curvas características de água no solo foram ajustadas segundo VAN GENUCHTEN (1980), por meio do programa Curvaret (DOURADO NETO et al., 1990), utilizando o seguinte modelo:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (a\psi_m)^n]^b} \quad (1)$$

Onde:  $\theta$  é o conteúdo de água no solo, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_r$  é a umidade residual do solo, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_s$  é a umidade de saturação do solo, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $a$ ,  $n$  e  $b$  são os coeficientes empíricos e;  $\psi_m$  é o potencial matricial de água no solo, em MPa.

O modelo matemático usado para descrever o escoamento superficial do solo deriva do modelo determinado por Smith (1972), citado por ALVES & CABEDA, (1999), que descreve a infiltração de água no solo:

$$i = (R - i_c) \times \left( \frac{t_p - t_0}{t} \right)^b + i_c, \text{ para } t > t_p \quad (2)$$

Cabeda (1980), citado por ALVES & CABEDA (1999) modificou o numerador da expressão “ $\left( \frac{t_p - t_0}{t} \right)^b$ ” para “ $\left( \frac{t_e}{t} \right)^b$ ” obtendo:

$$i = (R - i_c) \times \left( \frac{t_e}{t} \right)^b + i_c, \text{ para } t > t_e \quad (3)$$

Onde:  $i$  é a taxa de infiltração em um tempo  $t$  ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $R$  é a intensidade constante de chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $i_c$  é a taxa constante de infiltração ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $t_0$  é a assintótica vertical paralela ao eixo  $y$ , no gráfico de uma curva que descreve o processo de infiltração, sendo  $0 \leq t_0 \leq t_p$ ;  $t_p$  é o tempo de empocamento da água sobre o solo (minutos);  $t_e$  é o tempo de início de escoamento da água sobre a superfície do solo

(minutos);  $t$  é o tempo após o início do escoamento (minutos) e  $b$  é o parâmetro de ajuste do modelo.

Como a infiltração de água no solo e o escoamento superficial são processos antagônicos, ou seja, o aumento dos valores de um causa a redução dos valores do outro em igual magnitude (sob intensidade constante de chuva), realizou-se as seguintes modificações no modelo de Smith: (i) substituindo-se o termo “ $R - i_c$ ” pela taxa constante de escoamento ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$ ; (ii) subtraindo-se 1 do resultado da expressão “ $\left(\frac{t_e}{t}\right)^b$ ” e; (iii) excluindo-se o termo “ $+ i_c$ ” na equação 2, obteve-se:

$$e = e_c \times \left\{ 1 - \left( \frac{t_e}{t} \right)^b \right\}, \text{ para } t > t_e \quad (4)$$

Onde,  $e$  é a taxa de escoamento superficial em um tempo  $t$  ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $t_e$  é o tempo de início de escoamento da água sobre a superfície do solo (minutos);  $t$  é o tempo após o início do escoamento (minutos) e  $b$  é o parâmetro de ajuste do modelo.

O escoamento superficial acumulado ( $e_a$ ) foi obtido através da integração da taxa de escoamento superficial em função do tempo:

$$e_a(t) = \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Foram feitas análises de regressão linear múltiplas estimando-se os parâmetros da equação 4 ( $e_c$ ,  $t_e$ ,  $b$ ) para as variáveis independentes incluídas no modelo usando a opção “stepwise” do SAS, em nível de 5% de significância. As variáveis utilizadas nessa opção foram: chuva (quantidade, duração e intensidade), declividade do terreno, massa seca na superfície e cobertura do solo, densidade (do solo e de partícula), porosidade do solo (macro, micro e total), textura (argila, silte e areia), umidade inicial e de saturação do solo.

Um exemplo de regressão múltipla é:

$$e_c = (\alpha \cdot DV) + (\beta \cdot IC) + (\lambda \cdot AG) - (\delta \cdot PT) + (\theta \cdot DS) \quad (6)$$

Onde,  $e_c$  é a taxa constante de escoamento superficial (variável dependente), DV é a declividade do terreno, IC é a intensidade da chuva simulada, AG é o teor de argila no solo, PT é a porosidade do solo, DS é a densidade do solo e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ ,  $\delta$ ,  $\theta$  são os coeficientes da equação de regressão linear múltipla.

Na definição das equações de regressão linear múltiplas, para prever os parâmetros do modelo foi estabelecido que o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma consistente com o conhecimento empírico e teórico do processo. A eficácia das funções foram avaliadas pelo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e graficamente pela relação 1:1 dos dados estimados versus os observados.

Os dados de taxa constante e tempo de início de escoamento superficial, quantidade de resíduo de massa seca, e porcentagem de cobertura da superfície do solo e declividade do terreno, foram analisados estatisticamente através do programa Statistical Analysis System (SAS), sendo a análise de variância e teste de Tukey determinados em nível de 5% de significância. Antes da realização das análise estatística citadas acima, todos os valores foram submetidos a transformação raiz quadrada ( $\sqrt{x+0,5}$ ) para homogeneizar a variância em virtude da grande heterogeneidade dos dados, comum nesse tipo trabalho (STORCK et al., 2000).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características físicas do solo

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da densidade de partícula e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) na camada superficial (0 a 10 cm) nos diferentes solos. Os valores de densidade de partícula e do solo variaram de 2,60 a 2,71 g cm<sup>-3</sup> e de 1,20 a 1,56 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, nos solos onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada. A macroporosidade e o teor de argila também variaram de 1,6 a 19,4% e de 11 a 63%, respectivamente.

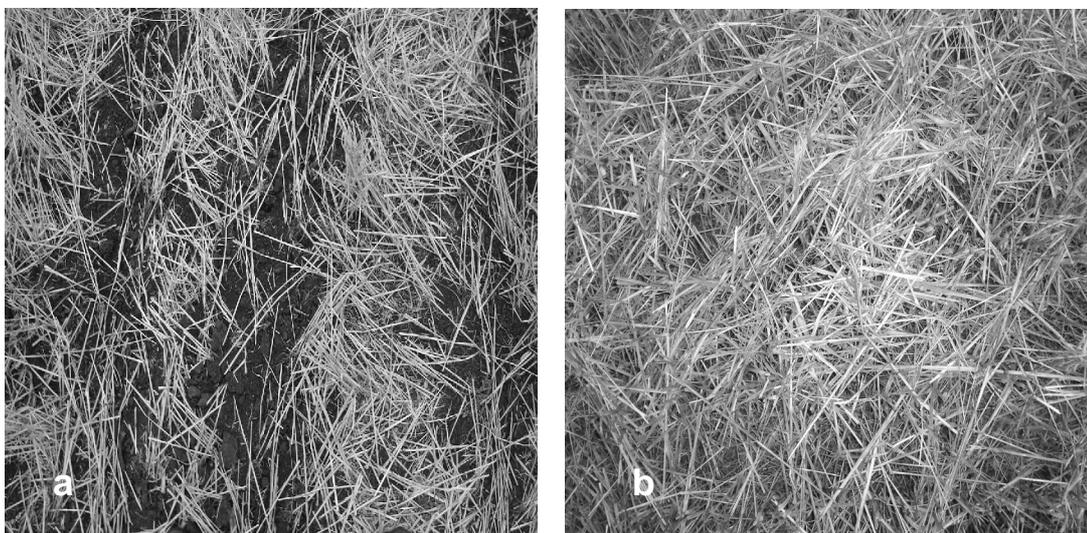
**Tabela 2-** Valores médios da densidade de partícula e do solo, porosidade (total, macro e micro) e textura (argila, silte e areia) nos diferentes solos do Uruguai e do Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.

Local	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )		Porosidade (%)			Textura (%)		
	Solo	Partícula	Total	Macro	Micro	Argila	Silte	Areia
Argissolo 1	1,52	2,66	42,2	9,4	32,8	19	27	54
Argissolo 2	1,51	2,71	46,2	1,6	44,6	11	8	81
Chernossolo	1,35	2,67	53,6	2,0	51,6	21	40	39
Latossolo	1,20	2,67	52,2	13,9	38,4	63	29	8
Neossolo	1,56	2,61	48,2	19,4	28,8	11	16	73
Vertissolo 1	1,29	2,65	57,8	3,6	54,2	40	22	38
Vertissolo 2	1,21	2,60	38,0	3,1	34,9	49	44	7

Os solos do Uruguai apresentaram uma reduzida macroporosidade (Tabela 2). Em parte, isso pode ser explicado pela presença de argilomineral (montmorilonita) com característica expansiva, presente nos Vertissolos 1 e 2 (DURAN 1991). Segundo Browning (1939), citado por REICHERT et al (1992), a

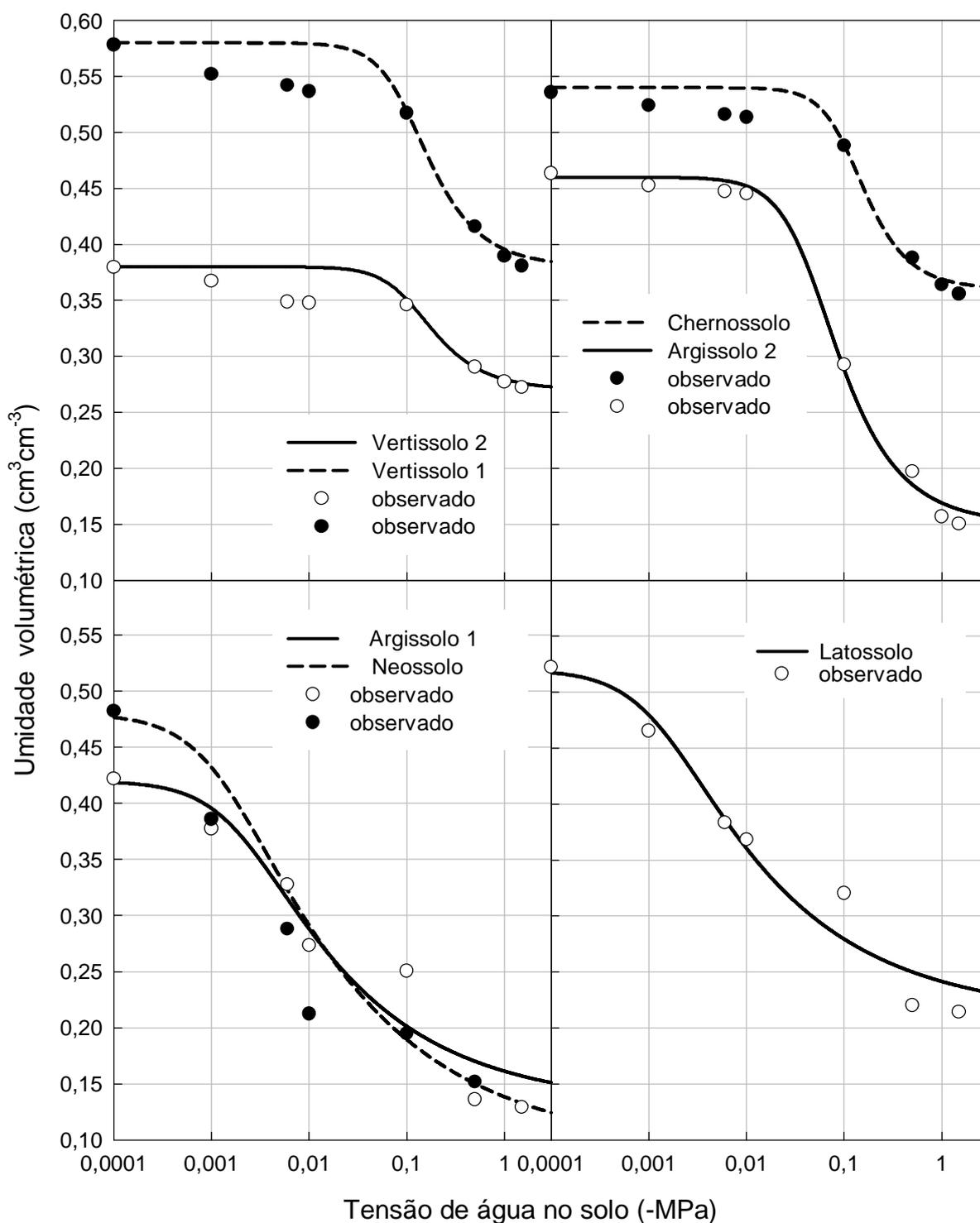
expansão da argila reduz a porosidade total e o diâmetro médio de poros, de tal forma que os poros não capilares se transformam em capilares e poros capilares podem ser completamente obstruídos. O Argissolo 2 e o Neossolo, são semelhante em relação a densidade do solo, textura e porosidade total, no entanto, a diferença nos valores de macroporosidade foi elevada.

A reduzida densidade do solo e a elevada macroporosidades observada no Latossolo, (mesmo com o elevado teor de argila) pode ser explicada pelo fato das operações de semeadura serem realizadas com o uso de sulcadores nas semeadoras de plantio direto (Figura 8). Isso causa um aumento da porosidade na linha de cultivo e contribui para o aumento da infiltração de água no solo, reduzindo as perdas por escoamento superficial.



**Figura 8-** Detalhe da cobertura do solo após a semeadura da soja, com o uso de sulcadores (a) e do cultivo seguinte após a colheita da aveia (b), quando foram realizadas as avaliações de chuva simulada no Latossolo. Santa Maria, RS, 2007.

Na figura 9 são apresentadas as curvas características de água no solo determinadas para a camada de 0 a 10cm de profundidade, para todos os solos onde foram realizadas as avaliações de chuva simulada. Os coeficientes das equações ajustados ao modelo de van Genuchten, para cada curva característica, são apresentados na Tabela 3.



**Figura 9-** Curvas características de água no solo ajustadas pelo modelo de van Genuchten para os diferentes solos testados. Santa Maria, RS, 2007.

**Tabela 3-** Valores da umidade residual e de saturação do solo, coeficientes das equações ajustadas ao modelo de van Genuchten para cada curva característica de água nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007.

Local	Umidade (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		Coeficiente			Coeficiente de ajuste do modelo
	$\theta_r$	$\theta_s$	a	n	b	
Argissolo 1	0,13	0,42	0,0505	1,3573	0,2632	0,936
Argissolo 2	0,15	0,46	0,0022	1,9018	0,4742	0,996
Chernossolo	0,36	0,54	0,0009	2,3652	0,5772	0,956
Latossolo	0,21	0,52	0,0789	1,3421	0,2549	0,957
Neossolo	0,09	0,48	0,1484	1,3123	0,2380	0,964
Vertissolo 1	0,38	0,58	0,0010	2,1077	0,5256	0,906
Vertissolo 2	0,27	0,38	0,0009	2,1164	0,5275	0,853

A água retida no solo entre os pontos de umidade residual e de saturação ( $\theta_r$  e  $\theta_s$ , respectivamente) nos solos do Uruguai (com exceção do Argissolo 2), foram menores, quando comparado aos solos do Rio Grande do Sul (Figura 9). A presença de argilomineral (montmorilonita) com característica expansiva presente nesses solos pode ser a explicação para esse comportamento.

#### 4.2 Intensidade, duração e quantidade de chuva, declividade do terreno e as perdas de água por escoamento superficial

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de escoamento superficial, chuva (quantidade, intensidade e duração) e declividade do terreno, observados na aplicação das chuvas simuladas nos diferentes solos. A intensidade final real de cada chuva aplicada não correspondeu à chuva programada devido à ocorrência de rajadas de vento e de pequenas variações na pressão nos bicos do simulador durante a aplicação das mesmas. A aplicação de duas chuvas simuladas no mesmo local, objetivou a determinação as perdas de água por escoamento superficial no solo com baixa (chuva 1) e alta (chuva 2) umidade inicial. No Neossolo e no Latossolo não houve a aplicação da chuva 2, pois o solo encontrava-se com a umidade inicial elevada.

**Tabela 4-** Valores médios de chuva (intensidade, duração e quantidade), escoamento superficial e declividade do terreno observados nas avaliações realizadas com chuva simulada nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007.

Local	Intensidade da chuva (mm h <sup>-1</sup> )	Duração da chuva (min)	Quantidade de chuva (mm)	Escoamento superficial (mm)	Declividade do terreno (%)
Chuva 1					
Argissolo 1	125	60	125	69,7	6,5
Argissolo 1	66	75	82	52,1	5,3
Argissolo 1	35	95	56	37,6	2,5
Argissolo 2	102	60	102	46,5	13,9
Argissolo 2	42	60	42	10,4	13,4
Argissolo 2	20	120	41	0,0	14,2
Chernossolo	82	120	164	45,6	5,6
Chernossolo	52	120	104	18,2	5,4
Chernossolo	51	60	51	0,0	3,8
Latossolo	107	90	160	48,3	0,8
Latossolo	59	90	89	23,3	3,4
Latossolo	35	90	52	10,2	1,4
Neossolo	122	60	122	60,6	5,2
Neossolo	59	90	90	29,4	4,8
Neossolo	31	105	55	29,0	4,0
Vertissolo 1	116	60	116	66,7	3,2
Vertissolo 1	65	60	65	36,9	3,2
Vertissolo 1	35	90	53	25,6	2,4
Vertissolo 2	116	120	233	36,4	3,8
Vertissolo 2	60	120	120	0,0	2,1
Vertissolo 2	32	120	64	0,0	3,3
Chuva 2					
Argissolo 1	120	60	120	89,5	6,5
Argissolo 1	64	60	64	51,7	5,3
Argissolo 1	35	60	35	23,2	2,5
Argissolo 2	99	60	99	37,6	13,9
Argissolo 2	52	60	52	13,0	13,4
Argissolo 2	29	120	58	9,0	14,2
Chernossolo	103	60	103	56,6	5,6
Chernossolo	59	60	59	34,1	5,4
Chernossolo	32	90	49	13,2	3,8
Vertissolo 1	112	60	112	76,7	3,2
Vertissolo 1	61	60	61	45,9	3,2
Vertissolo 1	32	90	47	38,4	2,4
Vertissolo 2	119	60	119	53,9	3,8
Vertissolo 2	62	90	93	15,5	2,1
Vertissolo 2	34	120	68	0,0	3,3

Nas avaliações com chuva simulada realizados no Uruguai, as perdas acumuladas por escoamento superficial, em relação a quantidade total de chuva, foram de 64, 32, 30 e 15%, para o Vertissolo 1, Chernossolo, Argissolo 2 e Vertissolo 2, respectivamente. E nas avaliações realizadas no Rio Grande do Sul, as perdas acumuladas por escoamento superficial, em relação a quantidade total de chuva, foram de 67, 45 e 27%, para o Argissolo 1, Neossolo e Latossolo, respectivamente.

Na chuva 1, no Vertissolo 2 houve escoamento superficial somente na intensidade de chuva de  $116 \text{ mm h}^{-1}$  (Tabela 4). Dos 233 mm aplicados via chuva simulada, apenas 36,4 mm (15,6%) escoaram pela superfície do solo. Nas avaliações realizadas com intensidade de chuva de  $30 \text{ mm h}^{-1}$  não houve escoamento superficial. Os reduzidos valores de escoamento superficial (chuva 1), estão associados a baixa umidade do solo, uma vez que não havia registros de chuvas significativas à pelo menos 60 dias nesse local, isso ocasionou a formação de fissuras no solo (Figura 10), favorecendo a infiltração de água. Isso pode ser comprovado ao comparar-se a umidade do solo antes da realização da chuva simulada ( $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , Tabela 6) e a umidade a  $-1,5 \text{ MPa}$  (ponto de murcha permanente) que era de  $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Esses resultados indicam que o conteúdo de água no solo estava abaixo do ponto de murcha permanente. Na realização da chuva 2 houve um aumento no escoamento superficial, isso provavelmente esta associado à lâmina de água aplicada na chuva 1, o que provocou a expansão das argilas e a redução da porosidade do solo, corroborando com os resultados obtidos por REICHERT et al. (1992). No entanto, mesmo após as chuvas 1 e 2, as fissuras no solo permaneceram abertas.



**Figura 10-** Detalhe das fissuras no Vertissolo 2 (antes das avaliações com chuva simulada). Santa Maria, RS, 2007.

Os elevados valores de escoamento superficial no Vertissolo 1 estão associados à elevada umidade do solo antes da realização da chuva simulada (Tabela 5). Dos 116 mm aplicados via chuva simulada (intensidade de  $116 \text{ mm h}^{-1}$ ), na chuva 1, 66,7 mm (57,5%) escoaram pela superfície do solo. Em solos com umidade inicial elevada a capacidade de infiltração básica é atingida com menos tempo de chuva, quando comparado a solos com baixa umidade inicial. Além disso, trata-se de um solo argiloso (com característica expansiva) e com baixa macroporosidade (3,6%, Tabela 2). REICHERT et al. (1992) obtiveram resultados semelhantes trabalhando com Vertissolo (com argila expansiva) sob chuva simulada de  $86 \text{ mm h}^{-1}$ .

### **4.3 Umidade inicial e de saturação do solo**

Na Tabela 5 são apresentados os valores de intensidade da chuva e umidade do solo (inicial e de saturação) nos solos onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada.

No Vertissolo 2 os valores de umidade de saturação apresentaram problemas e foram extremamente baixos, quando comparados aos valores de umidade inicial do solo. Isso pode ser confirmado ao observarem-se os valores obtidos no Vertissolo 1, que possui um solo com características semelhantes ao Vertissolo 2, no entanto, os valores de umidade de saturação foram mais elevados. Considerando que o Vertissolo 2 possui argila com característica expansiva e quando as chuvas simuladas foram aplicadas encontrava-se extremamente seco e fissurado (Figura 10), provavelmente pode ter ocorrido algum dos seguintes problemas: (i) que a coleta da amostra de solo com o anel volumétrico tenha sido comprometida pela presença de agregados estáveis, fazendo com que o volume de solo contido no anel diferisse do volume do anel ( $65 \text{ cm}^3$ ); (ii) no laboratório, no momento do processamento das amostras, a saturação tenha sido insuficiente para expandir o solo e fendas ainda continuavam abertas reduzindo a quantidade de água retida no momento das determinações dos pontos mais elevados da curva característica de água no solo (umidade de saturação e a  $-0,0001 \text{ MPa}$ ) e; (iii) no laboratório, no

**Tabela 5-** Valores de intensidade da chuva e umidade do solo (antes da chuva e de saturação) nos diferentes solos. Santa Maria, RS, 2007.

Local	Intensidade da chuva (mm h <sup>-1</sup> )	Umidade inicial (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Umidade de saturação (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Chuva 1			
Argissolo 1	125	0,27	0,49
Argissolo 1	66	0,27	0,49
Argissolo 1	35	0,27	0,49
Argissolo 2	102	0,08	0,47
Argissolo 2	42	0,09	0,47
Argissolo 2	20	0,09	0,45
Chernossolo	82	0,29	0,58
Chernossolo	52	0,30	0,52
Chernossolo	51	0,32	0,51
Latossolo	107	0,51	0,57
Latossolo	59	0,46	0,57
Latossolo	35	0,45	0,57
Neossolo	122	0,39	0,48
Neossolo	60	0,36	0,48
Neossolo	31	0,34	0,48
Vertissolo 1	116	0,39	0,57
Vertissolo 1	65	0,41	0,58
Vertissolo 1	35	0,38	0,59
Vertissolo 2	116	0,22	0,37
Vertissolo 2	60	0,22	0,40
Vertissolo 2	32	0,21	0,38
Chuva 2			
Argissolo 1	120	0,37	0,49
Argissolo 1	64	0,36	0,49
Argissolo 1	35	0,36	0,49
Argissolo 2	99	0,15	0,47
Argissolo 2	52	0,13	0,47
Argissolo 2	29	0,16	0,45
Chernossolo	103	0,36	0,58
Chernossolo	59	0,36	0,52
Chernossolo	32	0,35	0,51
Vertissolo 1	112	0,43	0,57
Vertissolo 1	61	0,44	0,58
Vertissolo 1	32	0,42	0,59
Vertissolo 2	119	0,49	0,37
Vertissolo 2	62	0,53	0,40
Vertissolo 2	34	0,48	0,38

momento do processamento das amostras, a saturação tenha sido insuficiente (48 horas) para que a água atingisse o interior dos agregados, permanecendo insaturado e com ar aprisionado.

No Uruguai o Vertissolo 2, Argissolo 2 e Chernossolo foram os que apresentaram os menores valores de umidade inicial do solo antes da realização da chuva 1.

#### 4.4 Massa seca de resíduos vegetais e cobertura do solo

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de massa seca de resíduos vegetais, porcentagem de cobertura do solo e declividade do terreno nos diferentes solos testados.

**Tabela 6-** Valores médios de massa seca de resíduos vegetais, porcentagem de cobertura do solo e declividade do terreno nos diferentes solos testados. Santa Maria, RS, 2007.

Local	Massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo (Mg ha <sup>-1</sup> )	Cobertura do solo (%)	Declividade terreno (%)
Argissolo 1	8,3 a	100 a	4,8 b
Argissolo 2	4,4 ab	73 b	13,8 a
Chernossolo	6,1 a	100 a	4,9 b
Latossolo	7,3 a	100 a	1,7 b
Neossolo	7,3 a	100 a	4,7 b
Vertissolo 1	6,1 a	100 a	2,9 b
Vertissolo 2	0,9 bc	55 c	3,1 b

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P>0,05).

Para o Vertissolo 2 e Argissolo 2, os valores da massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo não diferiram significativamente entre si. No Argissolo 2 o valor de declividade do terreno diferiu significativamente dos demais solos. Os menores valores de porcentagem cobertura do solo foram observados no Vertissolo 2 e no Argissolo 2, que diferiram significativamente entre si e dos demais solos. Esse resultado está diretamente relacionado a quantidade de massa seca de resíduos

vegetais na superfície do solo, que também foi menor nesses dois solos, quando comparado aos demais. A partir de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de resíduo na superfície do solo, a cobertura do solo manteve-se em 100%. Na maioria dos solos onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada, o tipo de massa seca que predominou foi a de aveia (*Avena sativa* Schreb.). Esses valores são semelhantes aos observados por CARVALHO et al. (1990), que trabalhando com massa seca de trigo, obtiveram uma cobertura de solo maior que 90% para quantidades maiores de 6 Mg ha<sup>-1</sup> e aproximadamente 55% de cobertura para 1 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de resíduo vegetal.

#### **4.5 Tempo de início e a taxa constante de escoamento superficial**

Na Tabela 7 são apresentados os valores do tempo de início do escoamento superficial, taxa constante de escoamento e do expoente “b” do modelo modificado de Smith (ALVES & CABEDA, 1999) .

Ao comparar-se o tempo de início do escoamento superficial entre as chuvas 1 e 2, somente no Argissolo 2 não houve diferença significativa. Comparando-se o tempo de início do escoamento superficial entre as intensidades de chuvas simuladas (da chuva 1), observa-se que em pelo menos duas intensidades de chuva no Chernossolo, Neossolo e Latossolo não houve diferença significativa. Para a chuva 2, apenas no Chernossolo não houve diferença significativa para o tempo de início do escoamento superficial entre duas intensidades de chuva simulada (102,7 e 59,4 mm h<sup>-1</sup>).

O tempo de início do escoamento superficial, para a chuva 1 e 2, diminuiu com o aumento na intensidade da chuva, independentemente das condições da superfície do solo (Tabela 7). Segundo ALVES & CABEDA (1999), isso ocorre porque sob chuva de maior energia cinética, as alterações da superfície do solo ocorrem mais rapidamente, formando selo e diminuindo o tempo de início de escoamento superficial. Quanto maior for a intensidade e a duração da chuva maior será a energia cinética da mesma. Os autores relatam que a diminuição no tempo de início do escoamento superficial é menos intensa no plantio direto, quando

**Tabela 7-** Parâmetros de ajuste do escoamento superficial de água no solo pelo modelo modificado de Smith . Santa Maria, RS, 2007.

Local	Intensidade da chuva (mm h <sup>-1</sup> )	Tempo de Início do escoamento (min)		Taxa constante de escoamento (mm h <sup>-1</sup> )	Expoente "b"	
Chuva 1						
Argissolo 1	125,0	6,7*	c	88,2 <sup>ns</sup>	a	1,7
Argissolo 1	65,8	12,5*	b	58,3 <sup>ns</sup>	b	1,9
Argissolo 1	35,1	21,0*	a	34,1 <sup>ns</sup>	c	2,9
Argissolo 2	101,6	5,3 <sup>ns</sup>	b	49,8 <sup>ns</sup>	a	2,4
Argissolo 2	41,9	15,0 <sup>ns</sup>	a	11,9 <sup>ns</sup>	b	3,9
Argissolo 2	20,4	-		-		-
Chernossolo	82,2	41,8*	a	45,9*	a	2,6
Chernossolo	51,9	70,0*	a	23,4*	b	4,8
Chernossolo	51,0	-		-		-
Latossolo	107,0	16,2	b	49,5	a	2,4
Latossolo	59,0	18,3	b	21,6	b	2,4
Latossolo	34,7	28,3	a	12,1	c	3,2
Neossolo	121,8	6,3	b	77,6	a	2,1
Neossolo	60,2	19,9	a	26,2	b	3,0
Neossolo	31,4	20,0	a	22,4	b	2,9
Vertissolo 1	115,8	9,1*	c	87,4 <sup>ns</sup>	a	2,5
Vertissolo 1	64,6	20,3*	b	63,3 <sup>ns</sup>	b	3,8
Vertissolo 1	35,0	30,0*	a	31,0 <sup>ns</sup>	c	3,3
Vertissolo 2	116,3	62,0*		32,1*		3,6
Vertissolo 2	60,2	-		-		-
Vertissolo 2	31,8	-		-		-
Chuva 2						
Argissolo 1	119,9	2,8	c	96,3	a	1,8
Argissolo 1	64,3	5,5	b	54,6	b	2,1
Argissolo 1	35,2	13,7	a	32,6	c	3,4
Argissolo 2	99,1	6,3	c	42,1	a	1,8
Argissolo 2	52,4	17,1	b	17,9	b	4,2
Argissolo 2	29,2	50,0	a	7,4	b	6,4
Chernossolo	102,7	9,1	b	72,3	a	2,3
Chernossolo	59,4	13,5	b	48,6	b	2,9
Chernossolo	32,3	40,7	a	19,1	c	4,9
Vertissolo 1	111,8	5,8	c	91,4	a	2,0
Vertissolo 1	61,1	11,3	b	59,2	b	3,2
Vertissolo 1	31,5	18,2	a	30,8	c	4,4
Vertissolo 2	119,3	3,4	b	62,8	a	1,3
Vertissolo 2	62,1	18,6	a	13,3	b	2,2
Vertissolo 2	34,0	-		-		-

Médias seguidas de mesma letra, na coluna (para cada solo), não diferem significativamente pelo teste de Tukey (P>0,05). \* = significativa pelo teste de Tukey (P<0,05) para a comparação dos valores entre a chuva 1 e a 2 (para cada local), ns = não significativo (para cada solo)

comparada ao plantio convencional. Isto ocorre porque os resíduos vegetais interceptam o impacto da gota da chuva, dissipando a sua energia cinética, reduzindo os efeitos nas alterações superficiais. Os autores utilizaram duas intensidades de chuva, 63 e 87 mm h<sup>-1</sup>, e obtiveram um tempo de início de escoamento de 27 e 10 minutos, respectivamente.

O solo possui uma determinada capacidade de infiltração e o escoamento superficial tem início quando a chuva exceder esse valor. A partir desse momento, a magnitude do escoamento superficial vai depender da intensidade da chuva. O empoçamento da água nas depressões existentes na superfície do solo começa a ocorrer somente quando a capacidade de acumulação de água for ultrapassada (PRUSKI et al., 2003). De modo geral, a infiltração e o escoamento superficial são processos antagônicos (sob intensidade constante de chuva), a medida que um diminui (infiltração) o outro aumenta (escoamento), até atingirem certo equilíbrio dinâmico (estabilização). Nessas condições, quando a taxa de escoamento superficial praticamente não varia com o tempo passa a ser chamada de taxa constante de escoamento.

Nas avaliações realizadas no Argissolo 2, Vertissolo 1 e Argissolo 1, não houve diferença significativa para a taxa constante de escoamento entre a chuva 1 e a chuva 2, mesmo com umidades iniciais diferentes (Tabela 5). Segundo HILLEL (1970), quanto maior a umidade do solo no início da chuva, menor será a taxa infiltração inicial (devido ao menor potencial matricial do solo), e mais rapidamente será atingido a taxa constante de infiltração e do escoamento superficial, no entanto, esse valor independe da umidade inicial. BERNARDO (2002) cita que a diferença na velocidade de infiltração em um mesmo solo, com diferentes teores de umidade inicial, desaparece geralmente 60 minutos depois do início da chuva.

Comparando-se as taxas constantes de escoamento superficial entre as intensidades de chuva simulada em cada solo, para a chuva 1, observa-se que apenas para as intensidades de chuva de 60 e 31 mm h<sup>-1</sup> no Neossolo não houve diferença significativa. Para a chuva 2, somente nas intensidades de chuva de 52 e 29 mm h<sup>-1</sup> no Argissolo 2, não houve diferença significativa para a taxa constante de escoamento superficial.

Há uma relação inversa entre o tempo de início do escoamento e a taxa constante de escoamento, independentemente do solo e da chuva, isso pode ser observado principalmente no Vertissolo 1, Neossolo, Latossolo e Argissolo 1. Isso

esta associado à intensidade da chuva, pois quanto mais esta aumentar, menor será o tempo de início do escoamento e maior será a taxa constante de escoamento superficial. Em todos os solos avaliados, as altas taxas constantes de escoamento superficial estão associadas as maiores intensidades de chuvas simuladas, independentemente da condição de umidade inicial do solo (chuva 1 ou 2). Isso ocorre porque o solo possui uma determinada capacidade de infiltração e o escoamento superficial tem início quando a chuva exceder esse valor. A partir desse momento, a magnitude do escoamento superficial vai depender da intensidade da chuva. Quanto maior for a intensidade da chuva, maiores serão as perdas por escoamento superficial. REICHERT et al. (1992), utilizando sete diferentes solos, observaram um comportamento semelhante.

VOLK et al. (2004), trabalhando com chuvas simuladas de  $64 \text{ mm h}^{-1}$ , obtiveram resultados de tempo de início e da taxa constante escoamento superficial de 5 minutos e  $51 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. A densidade do solo e a declividade do terreno foram semelhantes às observadas no Argissolo 1. Nas avaliações realizadas por esses autores, não havia cobertura de massa de resíduos vegetais e a umidade inicial do solo foi de  $0,191 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . No entanto, o tempo de início e a taxa constante do escoamento de superficial foram semelhantes aos obtidos na chuva 2, no Argissolo 1 (para intensidade de chuva de  $64,3 \text{ mm h}^{-1}$ ). A umidade inicial e a massa seca de resíduos vegetais foram de  $0,360 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e de  $8,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente, no Argissolo 1. Aparentemente, o efeito causado pela reduzida umidade inicial e pela elevada quantidade de massa de resíduos vegetais no tempo de início do escoamento superficial foi semelhante nesses solos.

GARCIA (2005), trabalhando com chuva simulada (solo com as seguintes características: argila 60%; densidade do solo:  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ ; macro e porosidade total: 11 e 52%, respectivamente; umidade inicial:  $0,480 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ; declividade: 7,5%, cobertura do solo 93%) obteve valores semelhantes de tempo de início do escoamento e de taxa constante de escoamento aos observados no Latossolo. Para duas chuvas simuladas, de 70 e  $107 \text{ mm h}^{-1}$ , o tempo de início do escoamento superficial foi de 17 e 5 minutos, respectivamente. E, para as mesmas intensidades de chuva, a taxa constante de escoamento superficial foi de 19 e  $40 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente.

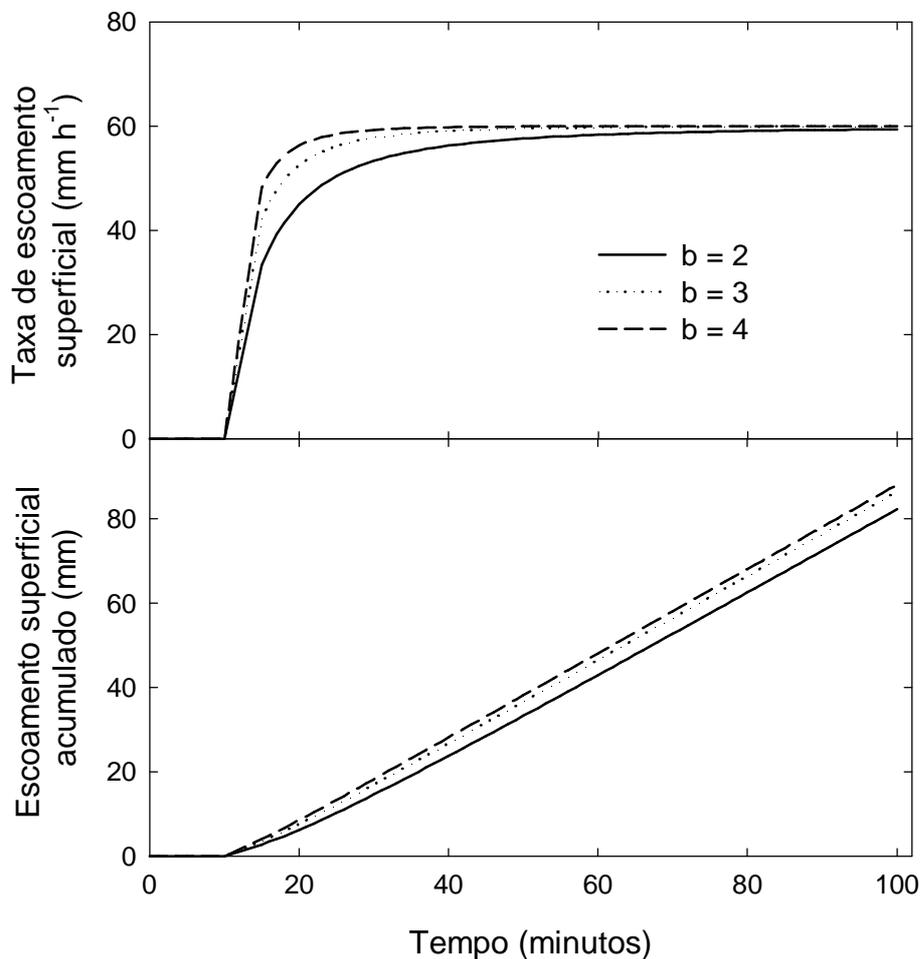
O expoente “b” do modelo modificado de Smith (Tabela 7), apresentou uma amplitude de 1,3 a 6,4, independentemente da intensidade da chuva, ou solo. Entre

os solos a maior e a menor variação foram observadas no Latossolo (2,4 a 3,2) e Argissolo 2 (1,8 a 6,4), respectivamente.

Observa-se uma tendência de aumento do expoente “b” com a redução da intensidade da chuva simulada, independentemente do solo, corroborando com os resultados obtidos por ALVES & CABEDA (1999). Esse comportamento está relacionado ao tempo em que uma determinada intensidade de chuva leva para atingir a taxa constante de escoamento superficial. Todos os fatores relacionados ao tempo de início do escoamento superficial (solo, cobertura vegetal, relevo, etc.) e a chuva (duração e intensidade) influenciam o expoente “b”, uma vez que é ajustado a partir destes fatores. Em geral, elevadas intensidades de chuva e solos com elevada umidade inicial tendem a resultar em baixos valores do expoente “b”. Na figura 11 pode-se observar a variação na taxa de escoamento e no escoamento acumulado em função de diferentes valores do expoente “b”, sob uma intensidade de chuva de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ . Um baixo valor de “b” resulta em uma curvatura de escoamento instantâneo mais suave e o valor constante de escoamento é atingido após mais tempo de chuva, quando comparado a um elevado valor de “b”. Há uma tendência de que as diferenças no escoamento superficial acumulado, verificada sob diferentes valores de “b”, se tornarem pequenas quanto maior for a duração da chuva. Em geral, observa-se que há uma tendência das diferenças no escoamento superficial acumulado se tornarem mínimas para valores de “b” acima de 3 (Figura 11).

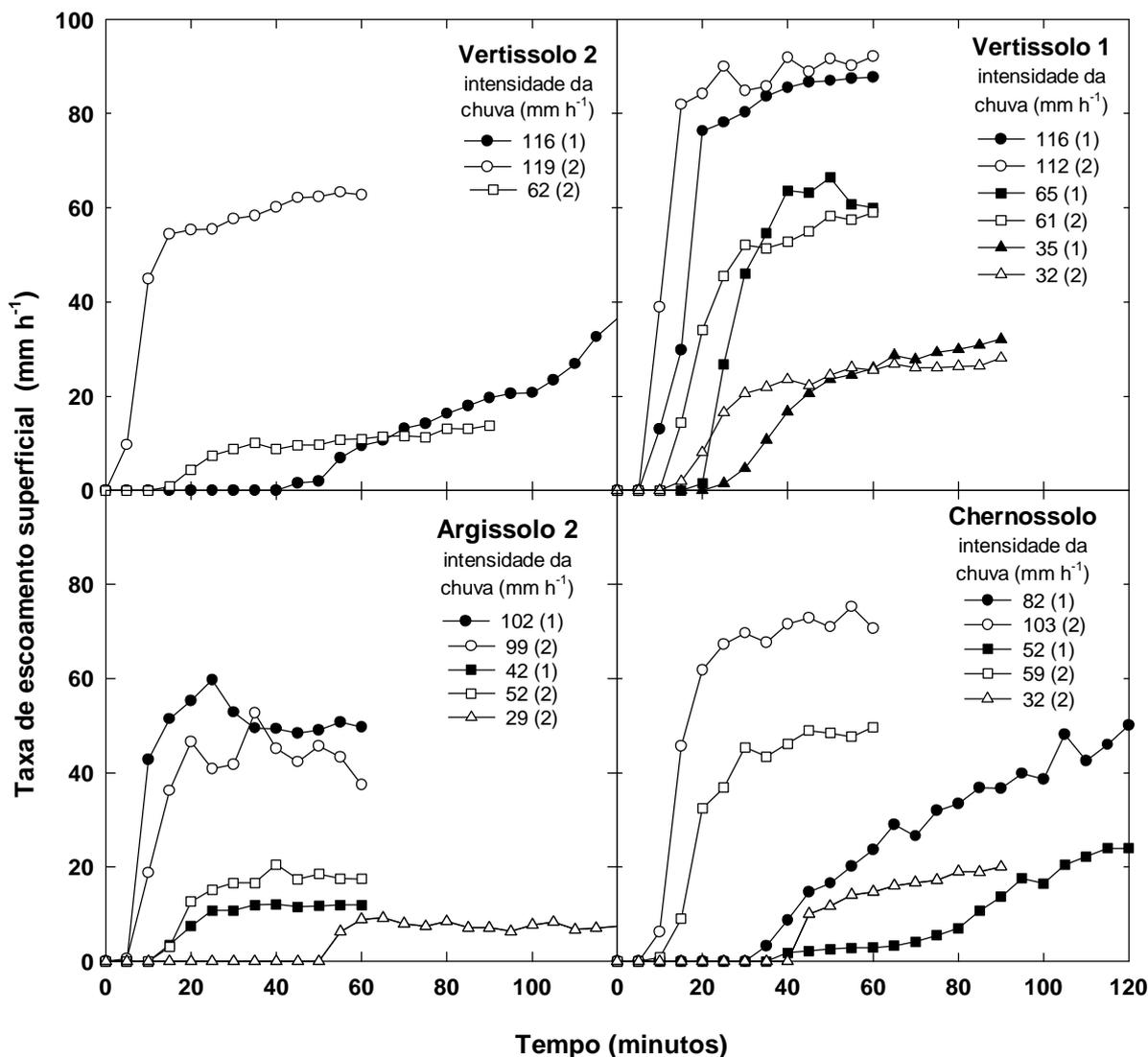
#### **4.6 Taxa de escoamento superficial**

Na figura 12 são apresentados os valores da taxa de escoamento superficial em função das diferentes intensidades de chuva simulada para a chuva 1 e 2, no Vertissolo 2, Vertissolo 1, Argissolo 2 e Chernossolo. Não houve escoamento superficial para chuva 1 nas intensidades mais baixas de chuvas simuladas (exceto no Vertissolo 1) e na intensidade intermediária ( $62 \text{ mm h}^{-1}$ ) no Vertissolo 2. Para a chuva 2 somente no Vertissolo 2 não houve escoamento superficial na intensidade mais baixa de chuva simulada.



**Figura 11-** Variação na taxa de escoamento e no escoamento acumulado em função de diferentes valores do expoente “b” do modelo modificado de Smith. Santa Maria, RS, 2007.

No Vertissolo 2 o solo encontrava-se bastante fissurado e contribuiu para o aumento da infiltração de água, isso explica os valores nulos de escoamento superficial em algumas intensidades de chuva. No entanto, após terem sido aplicados 233 mm de chuva (chuva 1) as perdas por escoamento superficial foram elevadas para a chuva 2 (para a intensidade de 119 mm h<sup>-1</sup>) e a taxa de escoamento superficial chegou a 63 mm h<sup>-1</sup> aos 60 minutos de chuva simulada. Para a intensidade de 62 mm h<sup>-1</sup>, os 120 minutos de chuva simulada não foram suficientes para obter-se a taxa constante de escoamento superficial.



**Figura 12-** Taxas de escoamento superficial em função das diferentes intensidades de chuva simulada no Uruguai. O valor entre parênteses significa: 1 = chuva 1 e 2 = chuva 2. Santa Maria, RS, 2007.

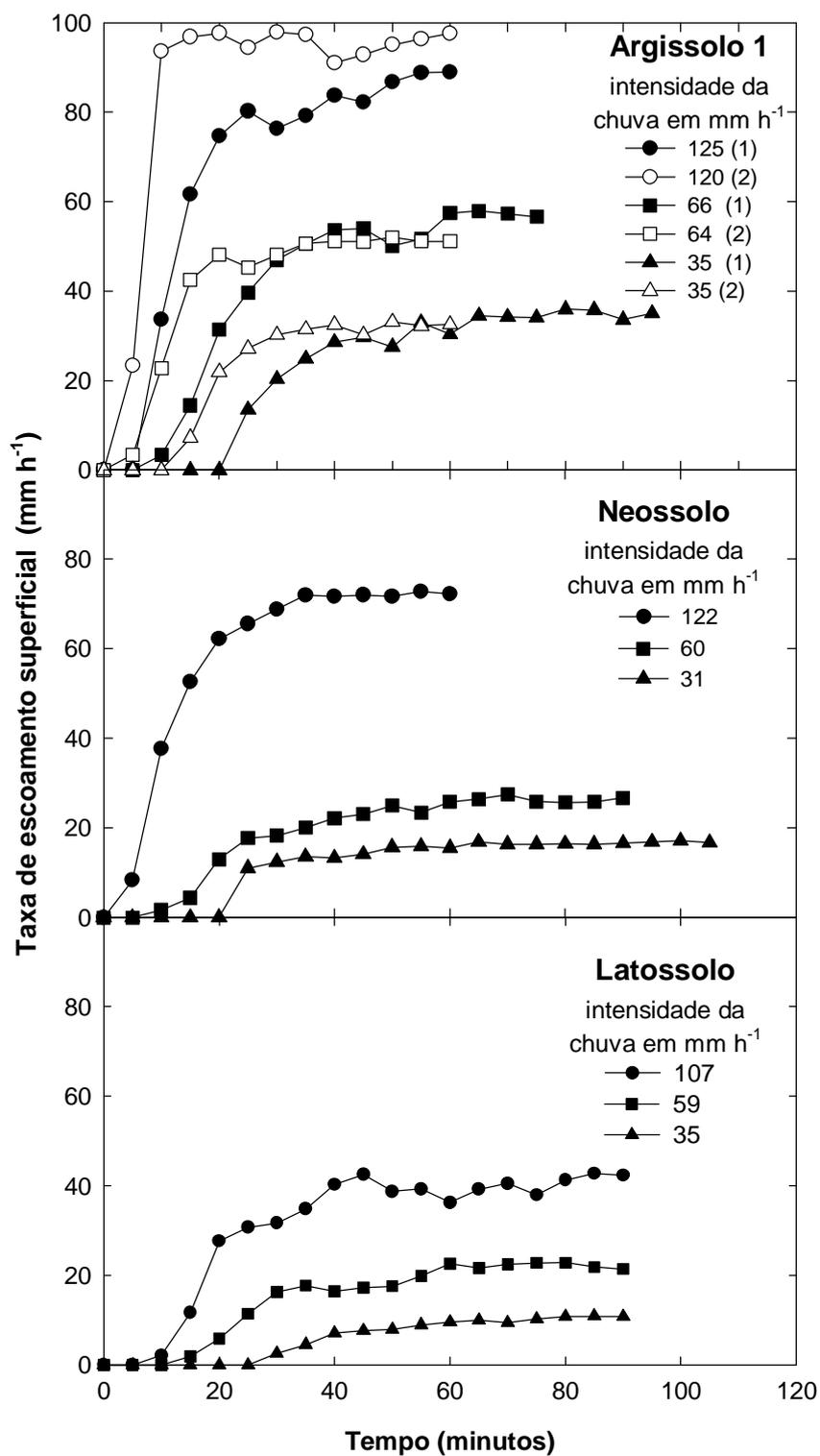
No Vertissolo 1 ocorreu escoamento superficial em todas as seis chuvas simuladas (Figura 12). A elevada umidade inicial do solo, fez com que o tempo de início do escoamento superficial ocorresse nos minutos iniciais das avaliações e a taxa constante de escoamento superficial foi rapidamente atingida.

No Chernossolo observa-se que a diferença nos valores das taxas de escoamento superficial foram elevadas entre a chuva 1 e a chuva 2, quando

comparados as diferenças observadas entre as mesmas chuvas no Vertissolo 1 e no Argissolo 2. Isso pode ser explicado pela elevada quantidade de massa seca de resíduos vegetais presente na superfície do solo ( $6,1 \text{ Mg h}^{-1}$ ) que estavam em decomposição e formavam uma camada espessa e bastante esponjosa. Na chuva 1 essa massa seca contribuiu para reter uma grande quantidade de água. Na chuva 2 essa massa provavelmente estava saturada e reduziu a retenção de água, contribuindo para aumentar o escoamento superficial. Rajadas de vento durante a chuva simulada de  $82 \text{ mm h}^{-1}$  fizeram com que não fosse atingida a taxa constante de escoamento superficial e reduziram a intensidade de chuva, que havia sido projetada para  $120 \text{ mm h}^{-1}$ .

Na figura 13 são apresentados os valores das taxas de escoamento superficial para as diferentes intensidades de chuvas simuladas no Argissolo 1, Neossolo e Latossolo. Nesses solos a elevada umidade inicial do solo fez com que o tempo de início do escoamento superficial ocorresse nos minutos iniciais e a taxa constante de escoamento superficial foi rapidamente atingida. As maiores taxas de escoamento superficial (médias da chuva 1 e 2), foram observadas no Argissolo 1, 92, 56 e  $33 \text{ mm h}^{-1}$  para as chuvas de intensidade de 123, 65 e  $35 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. Esses resultados podem ter sido causados pela baixa macroporosidade e porosidade total desse solo, quando comparado ao Latossolo e ao Neossolo (Tabela 2).

Os reduzidos valores de escoamento superficial observados no Latossolo podem ser resultados da reduzida densidade do solo e da elevada macroporosidade e porosidade total (mesmo com o elevado teor de argila). A utilização de sulcadores nas semeadoras de plantio direto nesses solos, contribuiu para o aumento da macroporosidade na linha de cultivo e resultou no aumento da infiltração de água no solo. CASSOL et al. (1999) trabalhando com diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa, observaram elevados valores de infiltração de água no tratamento que havia sido subsolado. Segundo o autor, as hastes do subsolador provocaram a quebra da camada de impedimento no solo, resultando no aumento da taxa de infiltração de água.

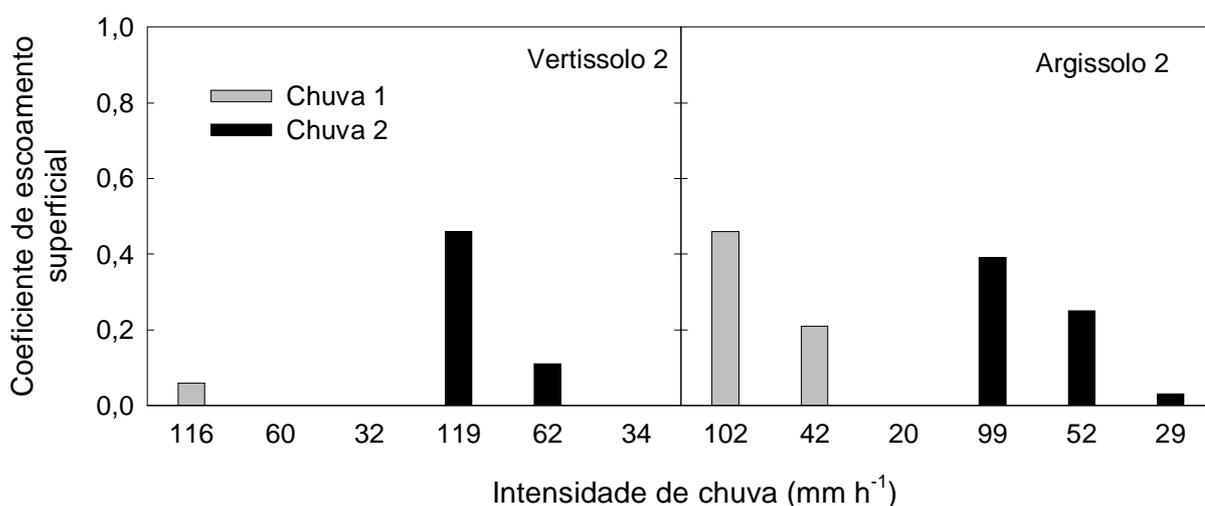


**Figura 13-** Escoamento superficial instantâneo em função das diferentes intensidades de chuva simulada no Rio Grande do Sul. O valor entre parênteses significa: 1 = chuva 1 e 2 = chuva 2. Santa Maria, RS, 2007.

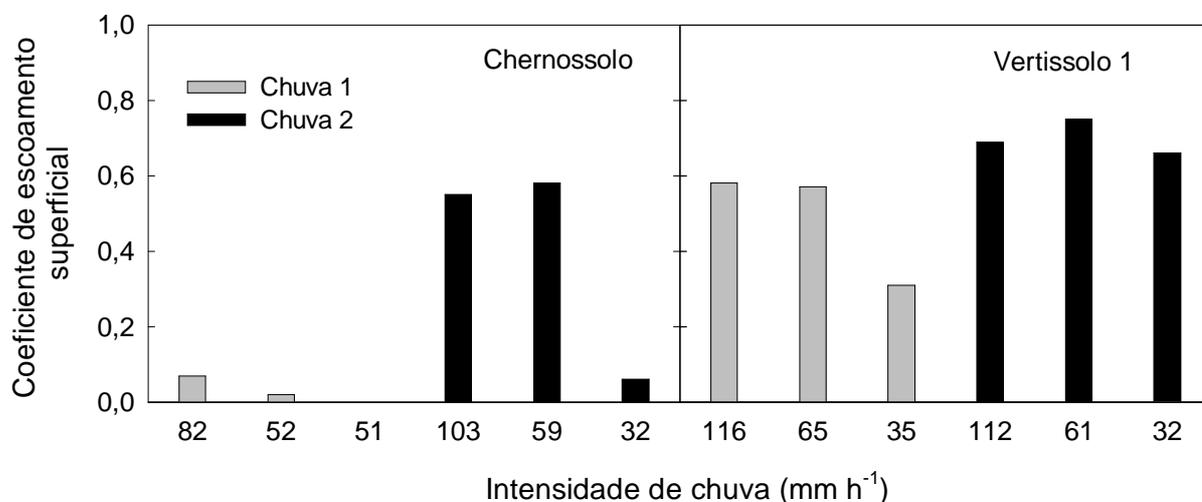
#### 4.7 Coeficiente de escoamento superficial

Na figuras 14, 15 e 16 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial para 60 minutos de chuva simulada no diferentes solos avaliados. O coeficiente de escoamento superficial foi calculado a partir da razão entre a quantidade chuva e o escoamento superficial. O coeficiente de escoamento superficial varia de zero a um, quanto mais próximo de zero, menores são as perdas de água por escoamento superficial.

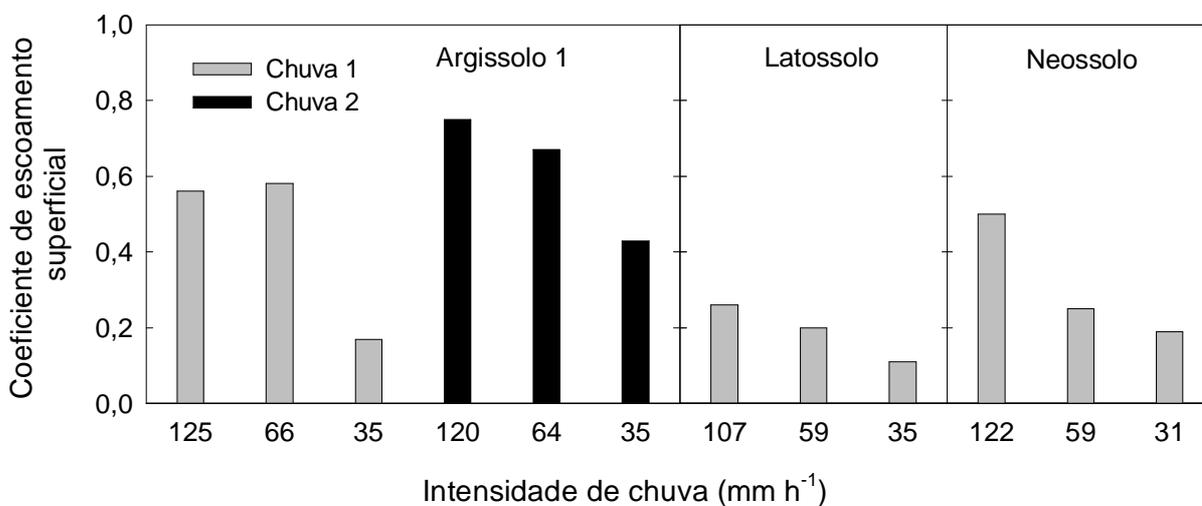
Independentemente do solo e da intensidade da chuva, os coeficientes de escoamento superficial foram menores para a chuva 1 (exceto no Argissolo 2). A umidade inicial do solo na chuva 1, em todos os solos foi menor em relação a chuva 2 (Tabela 6), isso causou um retardamento no tempo de início do escoamento superficial. Dessa forma, a lâmina de escoamento superficial acumulada em 60 minutos foi menor na chuva 1, e fez com que os valores do coeficiente de escoamento superficial fossem reduzidos, corroborando com os resultados obtidos por CARVALHO et al. (1990)



**Figura 14-** Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Vertissolo 2 e Argissolo 2. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 15-** Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Chernossolo e Vertissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 16-** Coeficiente de escoamento superficial em função da intensidade para uma chuva simulada de 60 minutos, no Argissolo 1, Latossolo e Neossolo. Santa Maria, RS, 2007.

Observa-se que em geral, há um aumento no coeficiente de escoamento superficial com o aumento das intensidades de chuva. Quanto maior for a intensidade da chuva maiores serão as perdas por escoamento superficial, ou em outras palavras, a porcentagem da chuva convertida em escoamento superficial aumenta como crescimento da intensidade e da duração da chuva (PRUSKI et al.,

2003). Os mais elevados coeficientes de escoamento superficial foram observados no Vertissolo 1 e Argissolo 1, com valores médios de 0,59 e 0,53, respectivamente. Apesar de elevados, estes valores estão muito próximos dos recomendados pela Soil Conservation Service – USDA, 0,5 e 0,6 para solo franco e argiloso, respectivamente, com 0 a 5 % de declividade (PRUSKI et al., 2003). O Vertissolo 1 e Argissolo 1 são classificados como franco argiloso e franco, respectivamente.

VOLK et al. (2004) e FONSECA & CASSOL (2002), trabalhando com chuvas simuladas (com intensidade de chuva de 64 e 120 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente) e condições de solo semelhantes aos observados no Argissolo 1 (chuva 2), obtiveram coeficientes de escoamento superficial de 0,69 e 0,68, respectivamente. CASSOL et al. (1999), avaliando o escoamento superficial em pastagem nativa, em um solo com condições semelhantes aos observados no Vertissolo 1 (chuva 2), obtiveram um coeficiente de escoamento superficial de 0,73 para uma chuva de 64 mm h<sup>-1</sup>.

#### **4.8 Resumo estatístico das variáveis em estudo**

O resultado da análise estatística dos parâmetros relacionados ao escoamento superficial, chuva, cobertura, condição de umidade e propriedades do solo, incluindo a média, valor mínimo e máximo e desvio padrão das variáveis para todo conjunto de dados do Rio Grande do Sul (63) e Uruguai (73), são apresentados na Tabela 8. No Vertissolo 2 as perdas de água por escoamento superficial foram muito abaixo do esperado, uma vez que o solo encontrava-se extremamente seco e fissurado. Os resultados das avaliações com chuva simulada não expressaram uma situação esperada em condições mais elevadas de umidade do solo, assim, os dados obtidos dessas avaliações foram omitidos das análises realizadas nos itens seguintes desse trabalho.

Os valores extremos de escoamento superficial observados foram de 115,7 e 4,3 mm h<sup>-1</sup>, no Argissolo 1 e Latossolo, respectivamente, ambos no Rio Grande do Sul. O menor tempo de início do escoamento superficial (02 minutos) foi observado no Argissolo 1 e o maior no Chernossolo (90 minutos).

**Tabela 8-** Valores máximos, mínimos, desvio padrão e médias das variáveis utilizadas para o conjunto de dados do Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Rio Grande do Sul				Uruguai			
	Maximo	Mínimo	Desvio padrão	Média	Maximo	Mínimo	Desvio padrão	Média
Taxa constante de escoamento	115,7	4,3	30,5	49,0	108,2	5,8	26,0	46,1
Tempo de início do escoamento	60,0	2,0	9,9	13,6	90,0	4,0	18,9	20,8
Escoamento superficial acumulado	98,7	3,4	25,7	45,0	96,5	3,4	21,8	37,7
Quantidade de chuva	160,1	35,2	33,6	93,6	164,4	41,9	33,5	83,4
Duração da chuva	105,0	60,0	16,7	76,1	120,0	60,0	22,8	75,2
Intensidade da chuva	125,0	31,4	35,7	78,9	115,8	29,2	30,0	70,7
Umidade inicial	0,505	0,270	0,071	0,379	0,441	0,076	0,128	0,296
Declividade	6,5	0,8	1,9	4,3	14,2	2,4	4,6	7,1
Massa seca na superfície	8,3	7,3	0,5	7,7	6,1	3,8	0,9	5,5
Cobertura do solo	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	73,0	12,6	91,6
Densidade do solo	1,56	1,20	0,16	1,43	1,59	1,27	0,12	1,39
Densidade de partícula	2,7	2,5	0,1	2,6	2,7	2,7	0,0	2,7
Porosidade do solo	52,2	42,2	4,3	46,9	57,7	45,2	4,6	52,7
Macroporosidade do solo	19,4	9,4	4,1	13,4	3,6	1,3	0,7	2,1
Microporosidade do solo	38,3	28,8	3,7	33,4	56,4	43,8	4,4	50,6
Argila	62,5	11,1	21,8	30,3	40,0	11,0	12,4	25,0
Silte	29,0	16,3	5,2	24,7	40,0	8,0	12,8	23,3
Areia	72,6	8,5	25,7	45,0	81,0	38,0	19,8	51,8
Umidade de saturação do solo	0,522	0,422	0,043	0,469	0,577	0,452	0,046	0,527
$\Delta\theta$	0,152	0,017	0,042	0,090	0,389	0,124	0,089	0,231

$\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo

Considerando conjuntamente o Rio Grande do Sul e o Uruguai, os valores máximos para a quantidade e intensidade da chuva foram de 164,4 mm e 125 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores mínimos foram de 35,2 mm e 29,2 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente.

As maiores amplitudes de variação dos parâmetros declividade, massa seca na superfície e cobertura do solo foram observados no Uruguai. No Rio Grande do Sul a amplitude de variação para a massa seca na superfície do solo foi muito

pequena e para a cobertura do solo foi nula. Esse resultado está diretamente relacionado à quantidade de massa seca na superfície do solo, que a partir dos 6 Mg ha<sup>-1</sup> manteve a cobertura do solo em 100%.

A amplitude de variação da densidade de partícula e do solo foi semelhante no Rio Grande do Sul e no Uruguai. No entanto, os valores de argila e areia apresentaram uma grande amplitude de variação nos solos do Rio Grande do Sul.

#### **4.9 Correlações entre variáveis estudadas**

Na Tabela 9 é apresentada a matriz de correlação de Pearson (conjunta para o Rio Grande do Sul e Uruguai) com os valores dos coeficientes de correlação ( $r$ ) para as variáveis determinadas durante as avaliações com chuva simulada.

A taxa constante de escoamento e o escoamento acumulado apresentaram altos valores de coeficiente de correlação somente em relação a intensidade da chuva e valores médios de coeficiente de correlação com a quantidade e duração da chuva. A taxa constante de escoamento e o escoamento acumulado apresentaram um coeficiente positivo em relação a intensidade da chuva, ou seja, o aumento da intensidade de chuva causa um aumento na taxa constante escoamento e no escoamento acumulado. A taxa constante de escoamento e o escoamento acumulado apresentaram um coeficiente de correlação baixo em relação a declividade, massa seca e cobertura do solo. A taxa constante escoamento e o escoamento acumulado não apresentaram correlação significativa ( $P > 0,05$ ) com as demais variáveis relacionadas as características físicas do solo (densidade do solo, macro, micro e porosidade total, argila, silte, areia e umidade de saturação), exceto para densidade de partícula. Todas as variáveis independentes variaram concomitantemente nos diferentes solos, e o efeito de uma variável sobre a taxa constante de escoamento e sobre o escoamento acumulado, pode estar sendo anulado pelo efeito contrário de outras variáveis. No entanto, para determinar-se o efeito de uma única variável sobre o escoamento superficial, seria necessário um número muito maior de simulações em solos semelhantes ou avaliações controladas onde houvesse alteração em apenas uma das variáveis.

**Tabela 9-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis avaliadas para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Taxa constante de escoamento	Tempo de início do escoamento	Escoamento superficial acumulado
Taxa constante de escoamento	1	-0,53*	0,95*
Tempo de início do escoamento	-0,53*	1	-0,58*
Escoamento superficial acumulado	0,95*	-0,58*	1
Quantidade de chuva	0,55*	-0,12 <sup>ns</sup>	0,63*
Duração da chuva	-0,51*	0,80*	-0,41*
Intensidade da chuva	0,80*	-0,55*	0,81*
Umidade inicial	0,25*	-0,01 <sup>ns</sup>	0,23*
Declividade do terreno	-0,20*	-0,09 <sup>ns</sup>	-0,18*
Massa seca na superfície	0,32*	-0,17 <sup>ns</sup>	0,35*
Cobertura do solo	0,33*	0,09 <sup>ns</sup>	0,29*
Densidade do solo	0,02 <sup>ns</sup>	-0,31*	0,06 <sup>ns</sup>
Densidade de partícula	-0,40*	0,26*	-0,39*
Porosidade do solo	0,07 <sup>ns</sup>	0,21*	0,01 <sup>ns</sup>
Macroporosidade do solo	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>
Microporosidade do solo	0,06 <sup>ns</sup>	0,22*	-0,04 <sup>ns</sup>
Argila	-0,02 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>
Silte	0,17 <sup>ns</sup>	0,33*	0,10 <sup>ns</sup>
Areia	-0,06 <sup>ns</sup>	-0,20*	-0,04 <sup>ns</sup>
Umidade de saturação do solo	0,07 <sup>ns</sup>	0,21*	0,01 <sup>ns</sup>
$\Delta\theta$	-0,25*	0,12 <sup>ns</sup>	-0,26*

\* = significativo em nível de probabilidade de 0,05, ns= não significativo,  $\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo

O tempo de início do escoamento superficial apresentou um alto valor de coeficiente de correlação em relação a duração da chuva e um coeficiente médio com a intensidade de chuva. O tempo de início do escoamento superficial apresentou um coeficiente de correlação negativo em relação a intensidade da chuva, ou seja, o aumento da intensidade da chuva reduz o tempo de início do escoamento superficial. Não houve correlação significativa ( $P>0,05$ ) com a umidade inicial, massa seca, cobertura do solo, macroporosidade, argila e  $\Delta\theta$  (diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo).

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as matrizes de correlação de Pearson com os valores dos coeficientes de correlação (r) para as variáveis determinadas durante as avaliações com chuva simulada no Rio Grande do Sul e no Uruguai, respectivamente. Essa análise foi realizada separadamente para observar se haveria alterações nas correlações entre as variáveis quando comparado aos resultados obtidos na análise conjunta (Tabela 9).

**Tabela 10-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Taxa constante de escoamento	Tempo de início do escoamento	Escoamento superficial acumulado
Taxa constante de escoamento	1	-0,76*	0,97*
Tempo de início do escoamento	-0,76*	1	-0,78*
Escoamento superficial acumulado	0,97*	-0,78*	1
Quantidade de chuva	0,69*	-0,55*	0,76*
Duração da chuva	-0,65*	0,67*	-0,52*
Intensidade da chuva	0,89*	-0,71*	0,88*
Umidade inicial	-0,30*	0,15 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>
Declividade do terreno	-0,02 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>
Massa seca na superfície	0,25 <sup>ns</sup>	-0,37*	0,14 <sup>ns</sup>
Cobertura do solo	0,11 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>
Densidade do solo	0,53*	-0,47*	0,48*
Densidade de partícula	-0,56*	0,33*	-0,51*
Porosidade do solo	-0,65*	0,48*	-0,60*
Macroporosidade do solo	-0,37*	0,22 <sup>ns</sup>	-0,30*
Microporosidade do solo	-0,47*	0,39*	-0,47*
Argila	-0,43*	0,36*	-0,38*
Silte	0,05 <sup>ns</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
Areia	0,35*	-0,27*	0,32*
Umidade de saturação do solo	-0,65*	0,48*	-0,60*
$\Delta\theta$	-0,26*	0,27*	-0,35*

\* = significativo em nível de probabilidade de 0,05, ns= não significativo,  $\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo

A taxa constante de escoamento (Tabela 10) apresentou um alto valor de coeficiente de correlação em relação a quantidade e a intensidade de chuva. Observa-se também, que o coeficiente de correlação foi positivo entre as variáveis. A taxa constante escoamento apresentou valores médios de coeficiente de correlação em relação a duração da chuva, densidade de partícula e do solo, porosidade total e umidade de saturação. A porosidade total foi assumida como sendo o valor correspondente à umidade de saturação, por esse motivo as correlações com a taxa constante de escoamento são idênticas. A taxa constante de escoamento apresentou um coeficiente de correlação negativo em relação a porosidade do solo, ou seja, o aumento da porosidade do solo causa uma redução na taxa constante de escoamento superficial.

**Tabela 11-** Matriz de correlação de Pearson com o coeficiente de correlação (r) das variáveis para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Taxa constante de escoamento	Tempo de início do escoamento	Escoamento superficial acumulado
Taxa constante de escoamento	1	-0,46*	0,94*
Tempo de início do escoamento	-0,46*	1	-0,51*
Escoamento superficial acumulado	0,94*	-0,51*	1
Quantidade de chuva	0,51*	0,05 <sup>ns</sup>	0,58*
Duração da chuva (min)	-0,38*	0,86*	-0,31*
Intensidade da chuva	0,73*	-0,51*	0,76*
Umidade inicial	0,56*	0,02 <sup>ns</sup>	0,43*
Declividade do terreno	-0,51*	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,39*
Massa seca na superfície	0,56*	0,08 <sup>ns</sup>	0,46*
Cobertura do solo	0,49*	0,20 <sup>ns</sup>	0,37*
Densidade do solo	-0,45*	-0,24*	-0,34*
Densidade de partícula	-0,54*	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,43*
Porosidade do solo	0,59*	0,01 <sup>ns</sup>	0,51*
Macroporosidade do solo	0,39*	-0,16 <sup>ns</sup>	0,26*
Microporosidade do solo	0,57*	0,04 <sup>ns</sup>	0,50*
Argila	0,53*	-0,08 <sup>ns</sup>	0,44*
Silte	0,26*	0,38*	0,17 <sup>ns</sup>
Areia	-0,50*	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,38*
Umidade de saturação do solo	0,59*	0,01 <sup>ns</sup>	0,51*
$\Delta\theta$	-0,49*	-0,03 <sup>ns</sup>	-0,35*

\* = significativo em nível de probabilidade de 0,05, ns= não significativo,  $\Delta\theta$ = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo

A taxa constante de escoamento apresentou um coeficiente de correlação negativo com o tempo de início do escoamento superficial, ou seja, à medida que há um atraso no tempo de início do escoamento superficial a taxa constante de escoamento reduz.

A taxa constante de escoamento apresentou baixos valores de coeficiente de correlação em relação ao teor de argila e areia do solo. Além disso, o sinal dos coeficientes foram o inverso do esperado, ou seja, a redução da argila e o aumento da areia causam o aumento na taxa constante de escoamento. Isso pode estar relacionado aos resultados observados no Latossolo e Argissolo 1, o primeiro com alto teor de argila e o segundo com alto teor de areia. Entretanto, devido ao manejo do solo utilizado nessas áreas, os valores de escoamento superficial foram baixos no Latossolo e elevados no Argissolo 1, causando uma inversão nos sinais dos

coeficientes de correlação de Pearson. O efeito do manejo utilizado nos solos refletiu-se na porosidade total e na macroporosidade, de tal modo que ambas apresentaram coeficientes de correlação negativos em relação a taxa constante de escoamento, ou seja, à medida que há um aumento na porosidade total e na macroporosidade do solo, a taxa constante de escoamento se reduz.

Não houve correlação significativa ( $P > 0,05$ ) da taxa constante de escoamento com a declividade do terreno, massa seca na superfície e cobertura do solo. Este resultado pode ser explicado, em parte, pela pequena amplitude da massa seca (7,3 a 8,3  $\text{Mg h}^{-1}$ ) e da amplitude nula da cobertura do solo (100%) observada nos solos avaliados.

O tempo de início do escoamento superficial (Tabela 10) apresentou um alto valor de coeficiente de correlação apenas em relação a intensidade da chuva e, coeficientes médios em relação a quantidade e duração da chuva. Os valores de coeficiente de correlação foram baixos em relação a massa seca, densidade do solo, porosidade total, argila e areia. Não houve correlação significativa com a umidade inicial, declividade do terreno e macroporosidade.

O escoamento superficial acumulado (Tabela 10) apresentou altos valores de coeficiente de correlação em relação a quantidade e a intensidade de chuva, em ambos os casos, o sinal do coeficiente foi positivo, ou seja, o aumento da quantidade e da intensidade de chuva provoca um aumento no escoamento superficial acumulado.

A taxa constante de escoamento (Tabela 11) apresentou um alto valor de coeficiente de correlação em relação a intensidade de chuva. Para as demais variáveis os valores dos coeficientes foram de médio a baixos.

O tempo de início do escoamento superficial (Tabela 11) apresentou um alto valor de coeficiente de correlação em relação a duração da chuva e um coeficiente médio em relação a intensidade da chuva. Para as demais variáveis não houve correlação significativa ( $P > 0,05$ ), exceto em alguns casos (densidade do solo e silte) onde o coeficiente de correlação foi baixo.

O escoamento superficial acumulado (Tabela 11) apresentou um alto valor de coeficiente de correlação em relação a intensidade da chuva. Para as demais variáveis os coeficientes foram baixos.

#### 4.10 Estimativa dos parâmetros do modelo modificado de Smith

O tempo de início e a taxa constante do escoamento superficial são determinados por inúmeras variáveis relativas à condição da superfície e estrutura do solo, da chuva (quantidade, duração e intensidade) e condições de relevo. FEPAGRO (2001) relata que o escoamento superficial é função de uma complexa interação de fatores como: chuva (intensidade, duração, quantidade, tempo de retorno, etc.), solo (textura, estrutura, permeabilidade, teor de matéria orgânica, etc.), manejo do solo (tipo de preparo; tipo, percentual e quantidade de cobertura do solo; espécie cultivada; densidade e espaçamento de plantas), práticas conservacionistas complementares (sistematização do terreno, locação de estradas, etc.).

Para meios porosos, como o solo, equações com base na teoria física sobre o comportamento desses meios podem ser usadas para descrever a infiltração de água no solo e o escoamento superficial. A solução dessas equações em geral são complexas, dada a heterogeneidade do solo, sua variabilidade espacial e as alterações que constantemente sofrem no tempo e no espaço, exigindo o conhecimento de parâmetros de solo de difícil e demorada determinação e de rápida modificação. Em função disso, tem sido vantajoso estimar a infiltração de água e escoamento superficial pelo uso de métodos empíricos que apresentem um pequeno número de parâmetros, dos quais não se requer, necessariamente, um significado físico específico, mas cujos valores possam ser preditos em bases consistentes. Esses parâmetros podem ser regionalizados quando os seus valores são correlacionados com características de solo ou do meio externo ao solo de determinadas bacias hidrográficas ou região (REICHERT et al., 1992).

A partir do modelo modificado de Smith (Equação 4) determina-se a taxa de escoamento superficial ( $e$ ), em  $\text{mm h}^{-1}$ , os parâmetros necessários para a utilização do modelo são: (i) taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$ ; (ii) tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ), em minutos e; (iii) o valor do expoente “b” ( $b$ ). A estimativa dos parâmetros do modelo modificado de Smith ( $e_c$ ,  $t_e$  e  $b$ ) a partir de equações de regressão multivariadas são discutidos nos itens seguintes.

#### 4.10.1 Estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ )

Na Tabela 12 são apresentadas três equações de regressão linear múltipla (A, B e C) para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$  e os respectivos coeficientes de determinação ( $r^2$ ). Na determinação das equações de regressão utilizaram-se os dados do Rio Grande do Sul e do Uruguai em conjunto, (exceto na equação C onde os dados do Argissolo 2 foram omitidos), totalizando 136 observações, com o objetivo de estabelecer uma única equação de regressão para os diferentes solos.

**Tabela 12-** Equações de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$  e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Equação A		Equação B		Equação C	
	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial
Chuva acumulada	ns		-0,32	0,03	ns	
Duração da chuva	ns		0,23	0,01	ns	
Intensidade da chuva	0,86	0,59	1,04	0,58	0,68	0,72
Umidade inicial	27,18	0,01	ns		ns	
Declividade do terreno	-1,70	0,06	-1,79	0,05	ns	
Massa seca na superfície do solo	4,94	0,13	5,95	0,12	ns	
Cobertura do solo	ns		ns		ns	
Densidade do solo	ns		ns		ns	
Densidade de partícula	-47,30	0,01	ni		ns	
Porosidade do solo	ns		ns		ns	
Macroporosidade do solo	-1,70	0,03	-1,88	0,03	-1,77	0,08
Microporosidade do solo	ns		ns		ns	
Argila	ns		ns		0,50	0,01
Silte	-0,31	0,01	ni		ns	
Areia	ns		0,21	0,01	0,75	0,04
Umidade de saturação do solo	ns		ns		ns	
$\Delta\theta$	ns		-49,58	0,01		
Intersecção	112,14		-35,63		-31,33	
$r^2$		0,84		0,84		0,85

$\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo;  $r^2$  parcial = contribuição de cada variável para o  $r^2$ ; ni = não incluídas no "stepwise"; \* = nível de significância de 5%, ns=não significativo

A equação A foi determinada utilizando-se todo o conjunto de variáveis determinadas para o Rio Grande do Sul e Uruguai, ou seja, não houve omissão de nenhuma variável na análise realizada por "stepwise". A equação B foi determinada conjuntamente para o Rio Grande do Sul e Uruguai, no entanto, na análise realizada

por “stepwise” foram omitidas as variáveis densidade de partícula e silte, por serem consideradas de pouca relevância para o escoamento superficial, quando comparadas a densidade do solo, argila e areia, por exemplo. A equação C foi determinada conjuntamente para o Rio Grande do Sul e Uruguai, no entanto, na análise realizada por “stepwise” foram omitidos os valores determinado no Argissolo 2.

A omissão das variáveis densidade de partícula e silte na determinação da equação B, fez com que as variáveis chuva acumulada, duração da chuva, areia e  $\Delta\theta$  se tornasse significativas. Os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) foram elevados nas três equações (variando de 0,84 a 0,85) e o número de parâmetros utilizados foi expressivo, 7 e 8, nas equações A e B, respectivamente. No entanto, em alguns dos coeficientes das equações o sinal foi o inverso ao esperado, ou seja, fazem com que a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) aumente quando deveria diminuir e vice-versa. Esse foi o caso da umidade inicial, da declividade e da massa seca, na equação A e, da declividade, massa seca, areia e da  $\Delta\theta$ , na equação B. A massa seca e a declividade são os parâmetros que depois da intensidade da chuva, apresentaram uma elevada relevância sobre o coeficiente de determinação das equações A e B. Essa incoerência pode estar relacionada aos resultados obtidos no Argissolo 2, que apresentou uma menor quantidade de massa seca e uma elevada declividade em relação aos demais solos (Tabela 5), no entanto, as taxas constantes de escoamento foram baixas (os resultados de Vertissolo 2 foram omitidos). Isso contraria a premissa de que, na definição das equações de regressão linear múltipla, para prever os parâmetros do modelo, o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma consistente com o conhecimento empírico e teórico do processo. Sendo assim, os resultados obtidos no Argissolo 2 foram omitidos na equação C, no entanto, a declividade e a massa seca não foram significativas.

Como o resultado das regressões lineares múltiplas da Tabela 12 não foram satisfatórias, no sentido de explicar o comportamento de  $e_c$  de forma coerente, procurou-se estabelecer regressões para o Rio Grande do Sul e o Uruguai separadamente. Na Tabela 13 são apresentadas as equações de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$  e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ), no Rio Grande do Sul e no Uruguai.

**Tabela 13-** Equações de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) em  $\text{mm h}^{-1}$  e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Rio Grande do Sul*		Uruguai*	
	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial
Chuva acumulada	ns		ns	
Duração da chuva	ns		ni	
Intensidade da chuva	0,64	0,79	0,64	0,53
Umidade inicial	ns		ni	
Declividade do terreno	1,21	0,02	ni	
Massa seca na superfície do solo	ns		ns	
Cobertura do solo	ns		ni	
Densidade do solo	ns		ni	
Densidade de partícula	ns		ni	
Porosidade do solo	-2,00	0,08	ns	
Macroporosidade do solo	ns		ns	
Microporosidade do solo	ns		ns	
Argila	ns		0,74	0,27
Silte	ns			
Areia	ns		-0,28	0,02
Umidade de saturação do solo	ns		ns	
$\Delta\theta$	ns		ni	
Intersecção	86,81		-2,52	
$r^2$		0,89		0,82

$\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo;  $r^2$  parcial = contribuição de cada variável para o  $r^2$ ; ni = não incluídas no "stepwise"; \* = nível de significância de 5%, ns = não significativo

Quando o comportamento de uma característica na equação não afetava a taxa constante de escoamento superficial de forma consistente e coerente, esta era omitida da análise por "stepwise", até obter-se os resultados da Tabela 13.

Os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) foram elevados em ambas as equações (0,89 e 0,82) e o número de parâmetros utilizados foi menor que os observados na Tabela 12. Variáveis importantes como a duração da chuva, a massa seca na superfície, porcentagem de cobertura do solo, densidade do solo, macroporosidade e textura (argila, silte e areia) não foram significativas ( $P > 0,05$ ) na equação determinada para o Rio Grande do Sul. No entanto, a porosidade total que está presente na equação, é influenciada por várias características físicas (textura, estrutura, densidade, etc.) e pelo manejo do solo. Segundo MESQUITA & MORAES (2004) de um modo geral, os maiores valores de infiltração de água são encontrados

nos maiores valores de porosidade do solo. BOUMA (1991) relata que pequenos poros podem conduzir mais água quando são poros contínuos, enquanto poros maiores em uma dada seção podem não contribuir para o fluxo de água quando apresentam descontinuidade. A classificação por tamanho, não reflete o importante padrão de continuidade dos poros do solo. Isto pode justificar a não significância da macro e microporosidade na equação.

Na equação determinada para o Uruguai as variáveis, duração da chuva, umidade inicial, declividade do terreno, cobertura do solo, densidade do solo e de partícula e  $\Delta\theta$  foram omitidas da análise por “stepwise”, pois não afetavam a taxa constante de escoamento superficial de forma consistente e coerente. Variáveis importantes como a massa seca na superfície e a porosidade (total, macro e micro) não foram significativas ( $P>0,05$ ). Diferentemente dos resultados do Rio Grande do Sul, o teor de argila e de areia foram significativas e apresentaram um comportamento coerente em relação a taxa constante de escoamento.

No Rio Grande do Sul e no Uruguai, a intensidade da chuva responde por 0,79 e 0,53 do coeficiente de determinação ( $r^2$  parcial) da equação de estimativa da taxa constante de escoamento. Segundo PRUSKI et al. (2003), o escoamento superficial tende a crescer com o aumento da intensidade e a duração da chuva, a qual constitui a principal forma de entrada de água no ciclo hidrológico. Quanto maior a intensidade, mais facilmente a taxa de infiltração de água no solo é superada, provocando assim, o excesso de precipitação pluvial que escoará superficialmente. Quanto à duração da chuva, à medida que esta se prolonga, a capacidade de infiltração de água no solo se reduz, favorecendo o escoamento superficial.

A partir dos resultados da Tabela 13, a equação de regressão linear múltipla para estimativa da taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) para o Rio Grande do Sul pode ser expressa da seguinte forma:

$$e_c = 86,81 + 0,64IC + 1,21DV - 2,00PT \quad (7)$$

e para o Uruguai:

$$e_c = -2,52 + 0,64IC + 0,74AG - 0,28AR \quad (8)$$

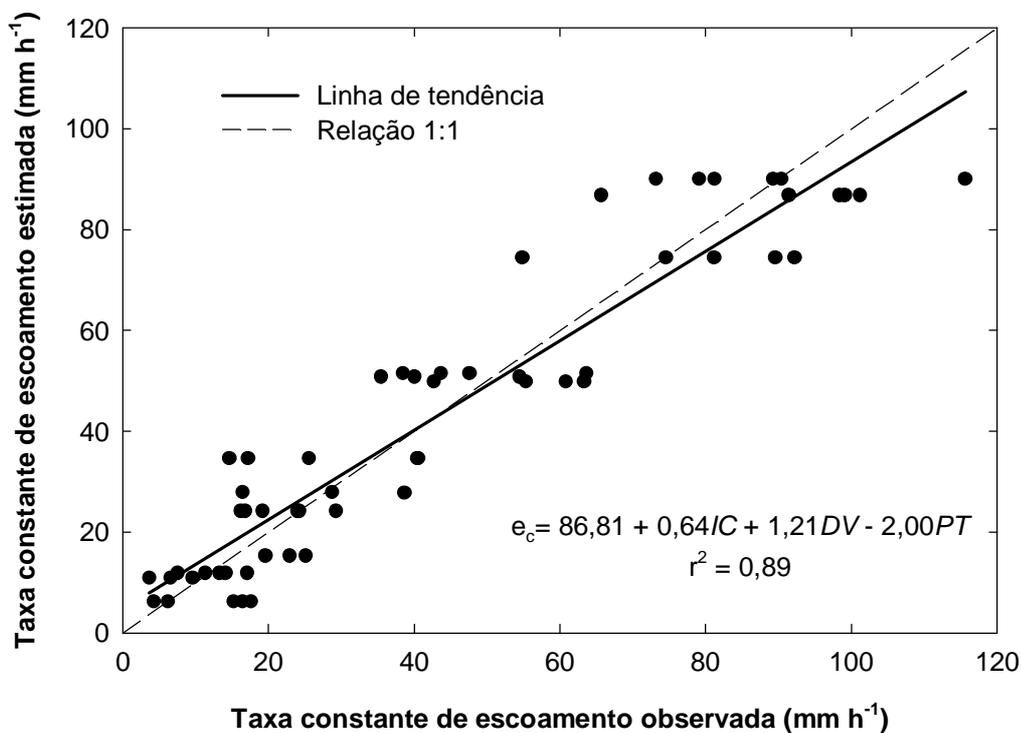
Onde,  $e_c$  é a taxa constante de escoamento superficial em  $\text{mm h}^{-1}$ ;  $IC$  é a intensidade da chuva em  $\text{mm h}^{-1}$ ;  $DV$  é a declividade do terreno em %;  $PT$  é a porosidade total do solo em %;  $AG$  é a fração de argila no solo em %; e  $AR$  é a fração de areia no solo em %.

A aferição dos ajustes das equações é feita, geralmente, usando o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e, normalmente, é assumido que o valor mais alto é o que possui a melhor capacidade de predição. Entretanto, a capacidade preditiva de uma equação também pode ser inspecionada visualmente comparando os dados estimados com os dados de curvas observadas (curva 1:1). Nas figuras 17 e 18 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das equações 7 e 8 obtidas por “stepwise” para o Rio Grande do Sul e Uruguai, respectivamente. Pela dispersão dos pontos em torno da linha de tendência (contínua) pode-se observar que o ajuste da equação 7 (para o Rio Grande do Sul) foi melhor que o da equação 8 (para o Uruguai). Há uma tendência de subestimativa dos valores da taxa de escoamento superficial para valores acima de  $50 \text{ mm h}^{-1}$  (aproximadamente), para ambos os locais. Isso pode ser observado ao comparar-se a linha contínua (linha de tendência) com a linha pontilhada (1:1).

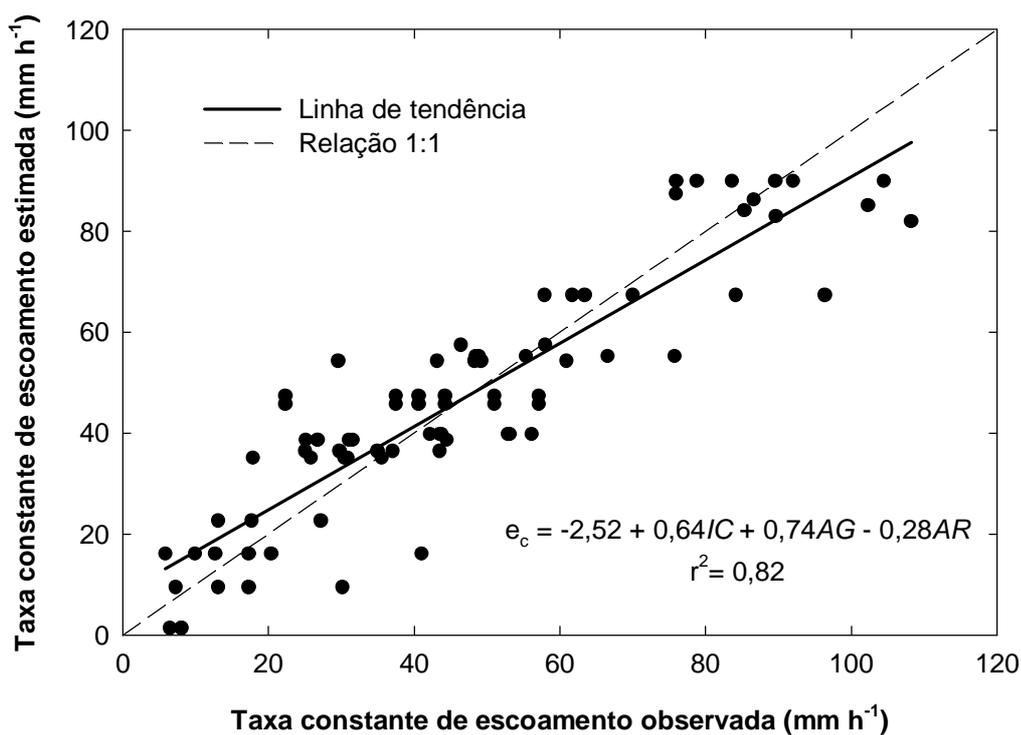
#### 4.10.2 Estimativa do expoente “b”

Na Tabela 14 são apresentadas as equações de regressão linear múltipla para estimativa do expoente “b” do modelo modificado de Smith e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Na determinação das equações de regressão utilizaram-se os dados do Rio Grande do Sul e do Uruguai em conjunto, para estabelecer uma única equação para os diferentes solos, e também separadamente para determinar equações específicas para cada local.

O número de variáveis significativas ( $P < 0,05$ ) é elevado na equação de regressão geral (para o Rio Grande do Sul e Uruguai), porém isso não se traduz em um elevado coeficiente de determinação (0,74), quando comparado as equações específicas para cada local (0,84 e 0,82, respectivamente para o Rio Grande do Sul e Uruguai).



**Figura 17-** Comparação entre os valores observados e estimados para a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 18-** Comparação entre os valores observados e estimados para a taxa constante escoamento superficial ( $e_c$ ) para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

**Tabela 14-** Equações de regressão linear múltipla para estimativa do expoente “b” e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Geral*		Rio Grande do Sul*		Uruguai*	
	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial
Chuva acumulada	-0,02	0,03	ns		ns	
Duração da chuva	0,03	0,02	ns		ns	
Intensidade da chuva	0,01	0,56	-0,01	0,66	-0,03	0,68
Umidade inicial	ns		ns		ns	
Declividade do terreno	ns		ns		0,37	0,04
Massa seca na superfície do solo	ns		ns		ns	
Cobertura do solo	ns		ns		ns	
Densidade do solo	ns		ns		-10,78	0,05
Densidade de partícula	4,67	0,03	ns		ns	
Porosidade do solo	ns		0,07	0,13	0,51	0,03
Macroporosidade do solo	-0,04	0,06	ns		ns	
Microporosidade do solo	ns		ns		-0,45	0,02
Argila	-0,02	0,02	-0,01	0,05	ns	
Silte	ns		ns		ns	
Areia	ns		ns		ns	
Umidade de saturação do solo	ns		ns		ns	
$\Delta\theta$	-0,02	0,02	ns		ns	
Intersecção	-9,10		0,55		14,00	
$r^2$		0,74		0,84		0,82

$\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo;  $r^2$  parcial = contribuição de cada variável para o  $r^2$ ; \* = nível de significância de 5%, ns = não significativo

A intensidade da chuva responde por 0,66 e 0,68 do coeficiente de determinação da equação de estimativa no Rio Grande do Sul e no Uruguai, respectivamente. O grande número de variáveis em uma equação de regressão multivariadas muitas vezes não é interessante devido a dificuldade de obtenção e o tempo gasto na obtenção dos dados, por isso a equação geral para estimativa de “b” não foi utilizada nos cálculos seguintes.

A partir dos resultados da Tabela 14, a equação de regressão linear múltipla para a estimativa do expoente “b” do modelo modificado de Smith (equação 4) para o Rio Grande do Sul pode ser expressa da seguinte forma:

$$b = 0,55 - 0,01IC + 0,07PT - 0,01AG \quad (9)$$

e para o Uruguai:

$$b = 14,00 - 0,03IC + 0,37DV - 10,78DS + 0,51PT - 0,45MI \quad (10)$$

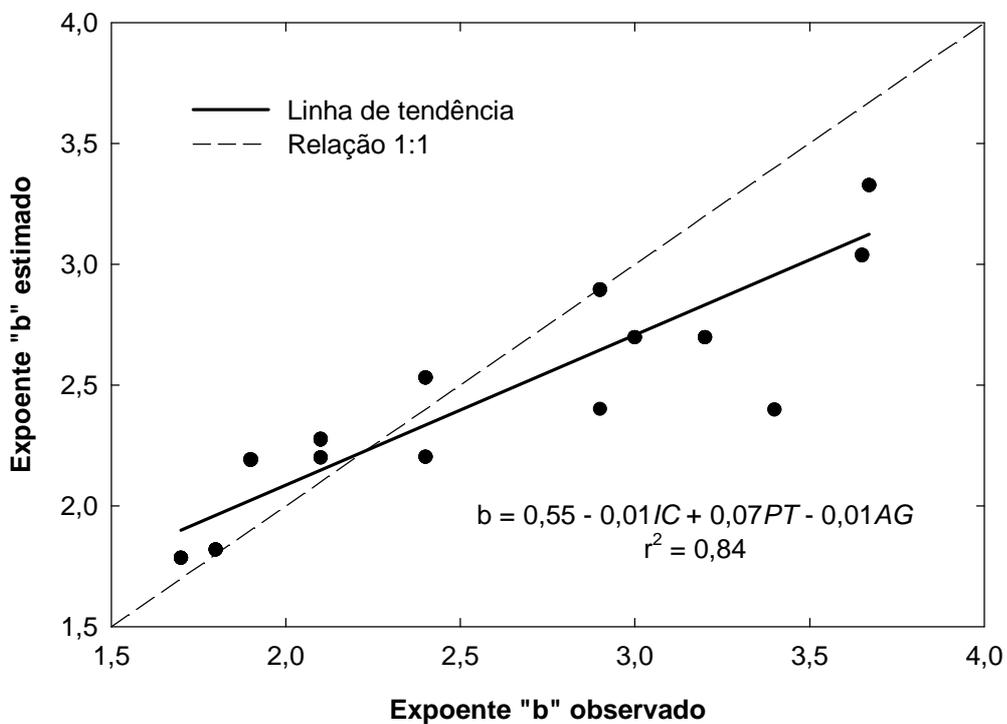
Onde,  $IC$  é a intensidade da chuva em  $\text{mm h}^{-1}$ ;  $PT$  é a porosidade total do solo em %;  $AG$  é a fração de argila no solo em %;  $DV$  é a declividade do terreno em %;  $DS$  é a densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$  e  $MI$  é a microporosidade do solo em %.

Nas figuras 19 e 20 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das equações 9 e 10 obtidas por “stepwise” para o Rio Grande do Sul e Uruguai, respectivamente. Pela dispersão dos pontos em torno da linha de tendência (contínua), observa-se que o ajuste da equação 9 (para o Rio Grande do Sul) foi semelhante ao da equação 10 (para o Uruguai). Há uma tendência de subestimativa para os valores de “b” acima de 2,25 e 3,1, para o Rio Grande do Sul e o Uruguai, respectivamente. Isso pode ser observado ao comparar-se a linha contínua (linha de tendência) com a linha pontilhada (1:1). Entretanto conforme discutido no item 4.5, em um mesmo local sob a mesma intensidade de chuva, valores de “b” acima de 3 resultam em pequenas diferenças no escoamento superficial acumulado.

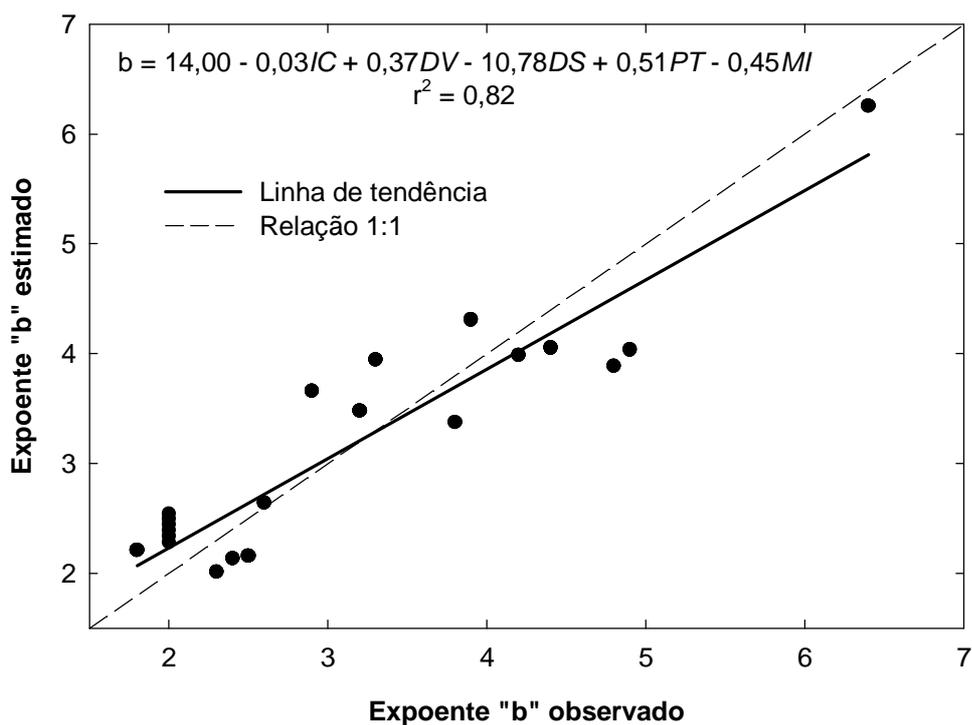
#### 4.10.3 Estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ )

Na Tabela 15 são apresentadas as equações de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) em minutos e o respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Na determinação das equações de regressão utilizaram-se os dados do Rio Grande do Sul e do Uruguai em conjunto, para estabelecer uma única equação para os diferentes solos, e também separadamente para determinar equações específicas para cada local. Quando o comportamento de uma característica na equação não afetava a taxa constante de escoamento superficial de forma consistente e coerente, este era omitido da análise por “stepwise”, até obter-se os resultados da Tabela 15.

O número de variáveis significativas ( $P < 0,05$ ) foi elevado na equação de regressão geral (para o Rio Grande do Sul e Uruguai), porém isso não resultou em um elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,73$ ). Na equação geral as variáveis declividade e macroporosidade foram omitidas da análise por “stepwise”, pois não afetavam o tempo de início do escoamento superficial de forma coerente.



**Figura 19-** Comparação entre os valores observados e estimados do expoente "b" do modelo modificado de Smith para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 20-** Comparação entre os valores observados e estimados do expoente "b" do modelo modificado de Smith para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

**Tabela 15-** Equações de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) em minutos e respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Rio Grande do Sul e Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Variável	Geral*		Rio Grande do Sul*		Uruguai*	
	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial	Coef.	$r^2$ parcial
Chuva acumulada	ns		ns		ns	
Duração da chuva	0,45	0,62	ni		ni	
Intensidade da chuva	-0,11	0,03	-0,16	0,51	-0,26	0,26
Umidade inicial	-35,54	0,01	-76,33	0,03	ns	
Declividade do terreno	ni		ns		ns	
Massa seca na superfície do solo	ns		12,13	0,03	ns	
Cobertura do solo	ns		ns		ns	
Densidade do solo	-42,05	0,01	ns		-169,89	0,06
Densidade de partícula	ns		ns		ns	
Porosidade do solo	ns		3,22	0,10	9,22	0,03
Macroporosidade do solo	ni		ns		ns	
Microporosidade do solo	-0,011	0,03	ns		-11,17	0,05
Argila	-0,23	0,01	ns		ns	
Silte	0,29	0,02	ns		0,95	0,14
Areia	ns		ns		ns	
Umidade de saturação do solo	ns		ns		ns	
$\Delta\theta$	ns		ns		246,20	0,06
Intersecção	62,44		-188,76		274,76	
$r^2$		0,73		0,67		0,60

$\Delta\theta$  = diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo;  $r^2$  parcial = contribuição de cada variável para o  $r^2$ ; ni = não incluídas no "stepwise"; \* = nível de significância de 5%, ns = não significativo

A duração da chuva é uma variável que não influencia diretamente o tempo de início do escoamento superficial, uma vez que na maioria das avaliações realizados a duração da chuva foi maior do que o tempo de início do escoamento superficial. Na determinação da equação geral a duração da chuva foi mantida nas análises devido a grande contribuição no ajuste desta equação ( $r^2$  parcial = 0,62). No entanto, durante avaliações realizadas com a equação geral verificou-se a incoerência nos resultados das estimativas para  $t_e$ , uma vez que pequenas variações na duração da chuva produziam grandes diferenças no tempo de início do escoamento superficial e isso não corroborava com os resultados observados a campo. Ao omitir-se a duração da chuva da análise por "stepwise" o coeficiente de determinação da equação foi muito baixo ( $r^2 = 0,45$ ).

Na determinação das equações para o Rio Grande do Sul e Uruguai, a duração da chuva foi omitida, pelo motivo citado anteriormente e também por tornar as equações limitadas a apenas duas variáveis significativas (duração e intensidade da chuva), excluindo variáveis importantes relacionadas a física e manejo do solo (umidade inicial, massa seca de resíduos vegetais, densidade e porosidade do solo). O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi de 0,67 para o Rio Grande do Sul e de 0,60 para o Uruguai. Durante as avaliações com a equação para o Rio Grande do Sul verificou-se que variações na massa seca de resíduos vegetais e na porosidade total do solo resultavam em valor inconsistente para o tempo de início do escoamento superficial. Trabalhando com a massa seca dentro dos limites (máximo e mínimo, 8,3 e 7,3 Mg h<sup>-1</sup>, respectivamente) da Tabela 8 resultava em um tempo de início do escoamento aceitável, no entanto, a amplitude desses limites foi pequena, restringindo o uso dessa equação em situações diferentes das observadas a campo. No caso da porosidade total do solo, mesmo trabalhando dentro dos limites citados na Tabela 8 (52,2 e 42,2 %), resultava em um valor de tempo de início do escoamento superficial inconsistente.

A partir dos resultados da Tabela 15, a equação de regressão linear múltipla para estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) para o Rio Grande do Sul, pode ser expressa da seguinte forma:

$$t_e = -188,76 - 0,16IC - 76,33UI + 12,13MS + 3,22PT \quad (11)$$

e para o Uruguai:

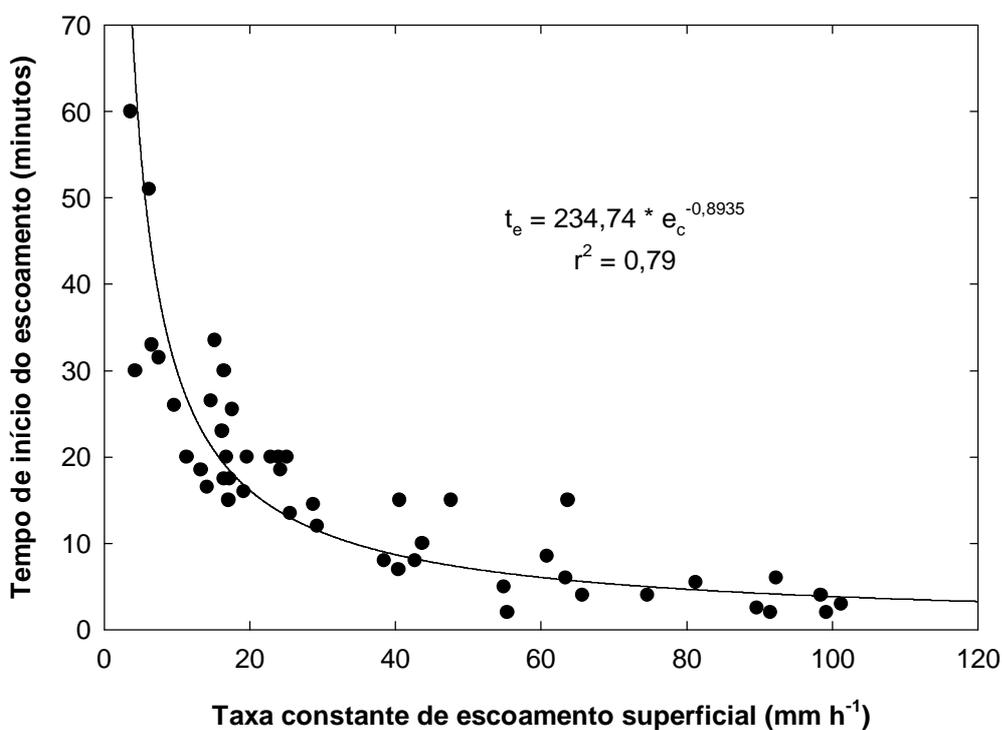
$$t_e = 274,76 - 0,26IC - 169,89DS + 9,22PT - 11,17MI + 0,95SI + 246,20Dq \quad (12)$$

Onde,  $t_e$  é tempo de início do escoamento superficial em minutos,  $IC$  é a intensidade da chuva em mm h<sup>-1</sup>;  $UI$  é a umidade inicial do solo em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $MS$  é a massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo em Mg ha<sup>-1</sup>;  $PT$  é a porosidade total do solo em %;  $DS$  é a densidade do solo em g cm<sup>-3</sup>;  $MI$  é a microporosidade do solo em %;  $SI$  é o teor de silte no solo em % e  $Dq$  é a diferença entre a umidade de saturação e a umidade inicial do solo em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>.

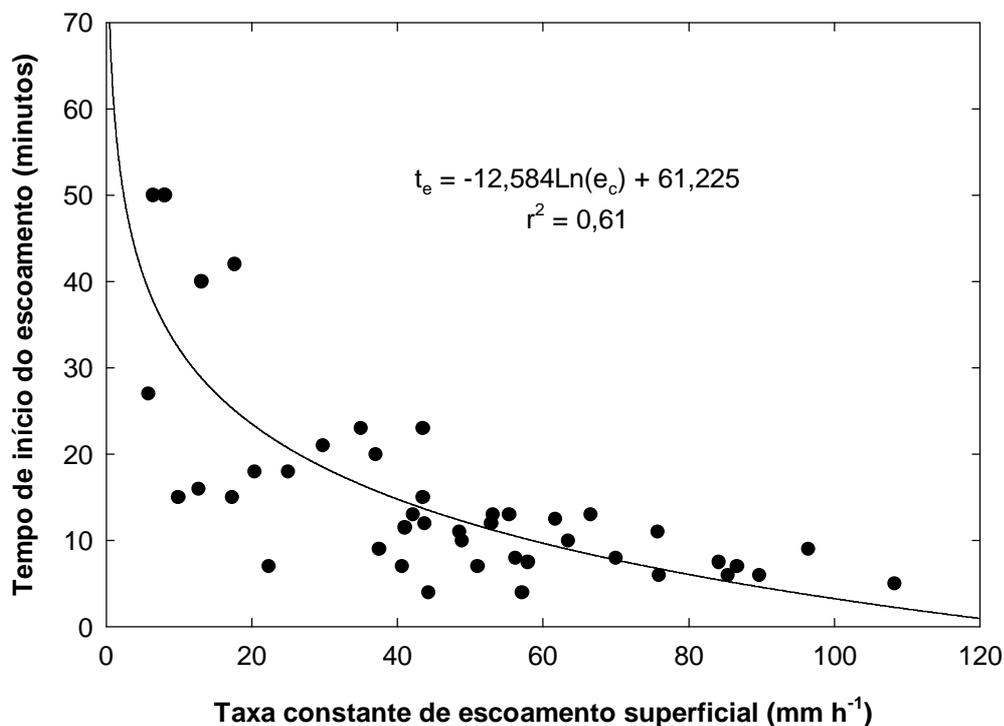
Observou-se na Tabela 10 um alto valor do coeficiente de correlação do tempo de início do escoamento superficial com a taxa constante de escoamento

superficial para o Rio Grande do Sul. Assim, procurou-se determinar equações que relacionassem essas duas variáveis. Observou-se também que havia uma maior correlação entre as variáveis (tempo de início e taxa constante de escoamento superficial) quando maior fosse a umidade inicial do solo.

Nas figuras 21 e 22 são apresentadas a relação entre a taxa constante de escoamento superficial e o tempo de início do escoamento superficial para o Rio Grande do Sul e Uruguai, respectivamente. O ajuste das equações apresentadas nas figuras 21 e 22 foram realizados utilizando-se os valores da taxa constante de escoamento e do tempo de início do escoamento das avaliações realizadas com elevada umidade inicial do solo (chuva 2, exceto para o Neossolo e Latossolo, onde foram utilizados os dados da chuva 1).



**Figura 21-** Relação entre a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) e o tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 22-** Relação entre a taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) e o tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) no Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

Para o Rio Grande do Sul o melhor ajuste foi uma equação do tipo exponencial ( $Y=aX^{-b}$ ). A amplitude do tempo de início do escoamento superficial utilizada no ajuste da equação foi grande, com um máximo de 60 e um mínimo de 2 minutos.

Para o Uruguai o melhor ajuste foi uma equação do tipo logarítmica ( $Y=Y_0+a.\ln X$ ). A amplitude do tempo de início do escoamento superficial utilizada no ajuste da equação foi grande, com um máximo de 51 e um mínimo de 4 minutos.

A umidade inicial do solo é uma variável que tem grande influência no tempo de início do escoamento superficial e, para determinar-se as equações das figuras 21 e 22, utilizaram-se os resultados obtidos sob elevada umidade inicial (item 4.3, Tabela 5, chuva 2, exceto para o Neossolo e Latossolo, onde foram utilizados os dados da chuva 1). Para estimar o tempo de início do escoamento superficial sob diferentes umidades do solo deve-se multiplicar os resultados das equações apresentadas nas figuras 21 e 22 pelo fator de umidade ( $f_u$ ). Solo com umidade inicial alta, média ou baixa correspondem ao valor de  $f_u$  de 1, 2 ou 4, respectivamente (Tabela 16). Os valores de  $f_u$  foram determinados a partir da

comparação do tempo de início do escoamento superficial entre a chuva 1 e a chuva 2, em cada solo onde foram realizadas as avaliações com chuva simulada.

Na Tabela 16 são apresentados os valores de  $fu$  em função de diferentes índices de precipitação antecedente (IPA), para cada solo onde foram realizados os ensaios com chuvas simuladas. Os limites para o IPA foram determinados a partir do fracionamento em três partes iguais da lâmina de água contida entre os pontos correspondentes de 0 a -1,5 MPa da curva característica de água em cada solo (na camada de 0 a 20 cm). Os resultados semelhantes foram agrupados.

**Tabela 16-** Fator de umidade ( $fu$ ) do solo para diferentes faixas do índice de precipitação antecedente (IPA). Santa Maria, RS, 2007.

Local	Umidade do solo		
	Baixa ( $fu = 4$ )	Média ( $fu = 2$ )	Alta ( $fu = 1$ )
Neossolo, Argissolo 1, Latosolo e Argissolo 2	IPA < 22	23 < IPA < 44	IPA > 45
Vertissolo 1 e Chernossolo	IPA < 12	13 < IPA < 24	IPA > 25

A determinação do valor do IPA pode ser realizada a partir da seguinte equação (SHAW, 1964):

$$IPA = P_{-1} + \frac{P_{-2}}{2} + \frac{P_{-3}}{3} + \frac{P_{-4}}{4} + \frac{P_{-5}}{5} + \frac{P_{-6}}{6} \quad (13)$$

onde:  $IPA$  é o índice de precipitação antecedente;  $P_{-1}$  a  $P_{-6}$  refere-se as precipitações pluviais ou chuvas, em mm, ocorridas do dia -1 (ontem) ao dia -6 (seis dias anteriores ao dia de hoje).

A partir dos resultados das figuras 21 e 22, a equação exponencial para determinação do tempo de início do escoamento superficial para o Rio Grande do Sul, pode ser expressada da seguinte forma:

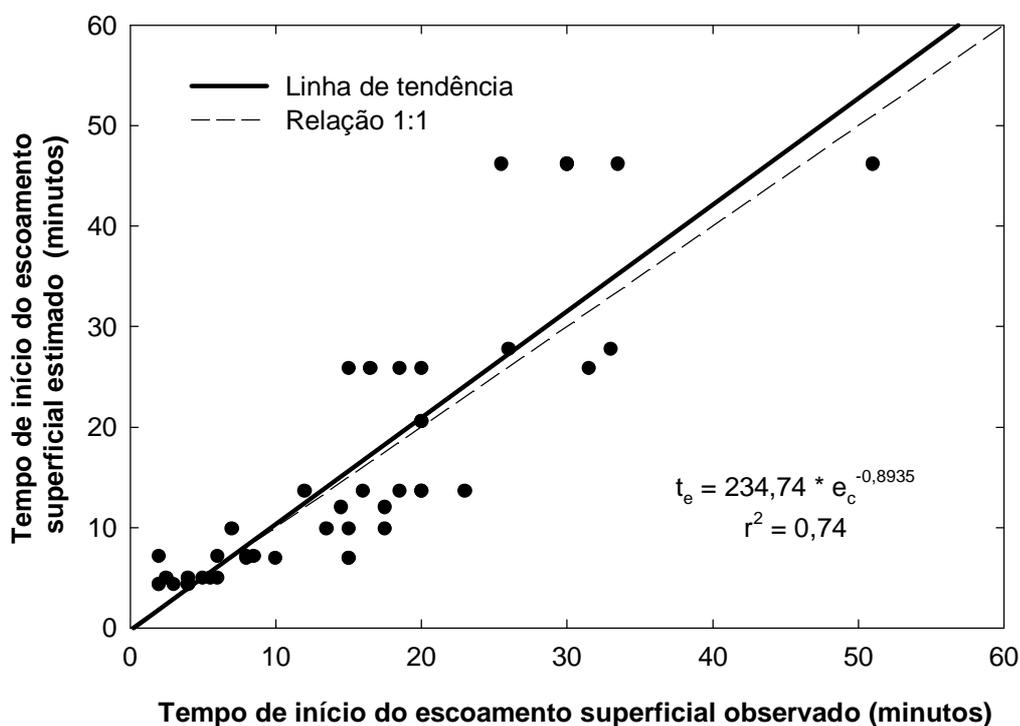
$$t_e = 234,74 \times e_c^{-0,8935} \times fu \quad (14)$$

e a equação logarítmica para o Uruguai:

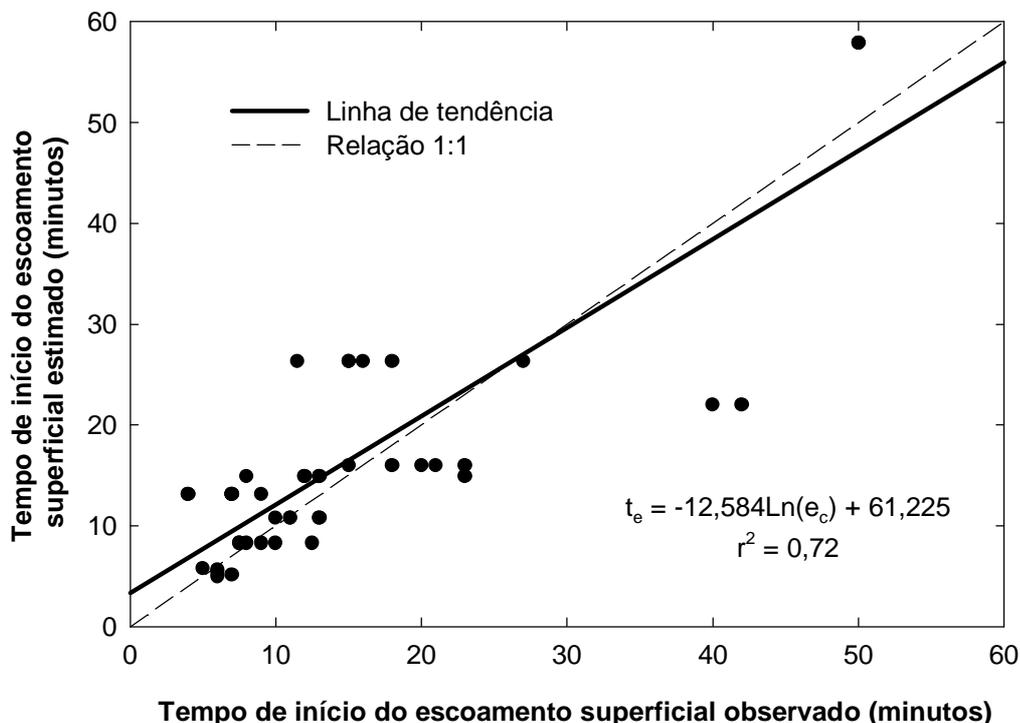
$$t_e = -12,58 \ln(e_c) + 61,23 \times fu \quad (15)$$

Onde,  $t_e$  é o tempo de início do escoamento superficial em minutos;  $e_c$  é a taxa constante de escoamento superficial em  $\text{mm h}^{-1}$  e  $fu$  é o fator de umidade inicial do solo (Tabela 16).

Nas figuras 23 e 24 são apresentados os resultados da capacidade preditiva das equações 14 e 15, para o Rio Grande do Sul e Uruguai, respectivamente. Há uma superestimativa para os valores do tempo de início do escoamento superficial acima de 10 minutos para o Rio Grande do Sul e abaixo dos 25 minutos para o Uruguai. Isso pode ser observado ao comparar-se a linha contínua (linha de tendência) com a linha pontilhada (1:1).



**Figura 23-** Comparação entre os valores observados e estimados do tempo de início do escoamento superficial para o Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2007.

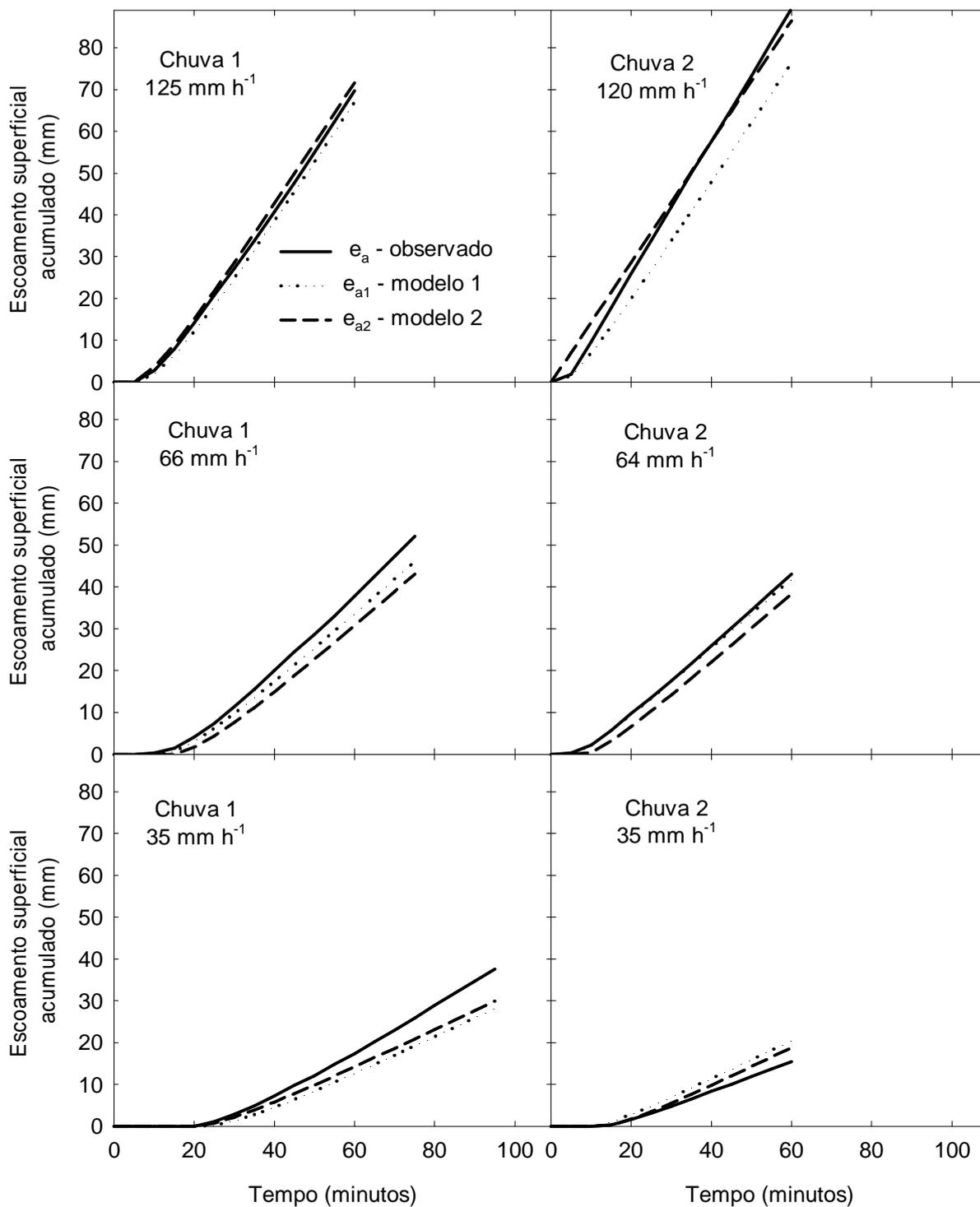


**Figura 24-** Comparação entre os valores observados e estimados do tempo de início do escoamento superficial para o Uruguai. Santa Maria, RS, 2007.

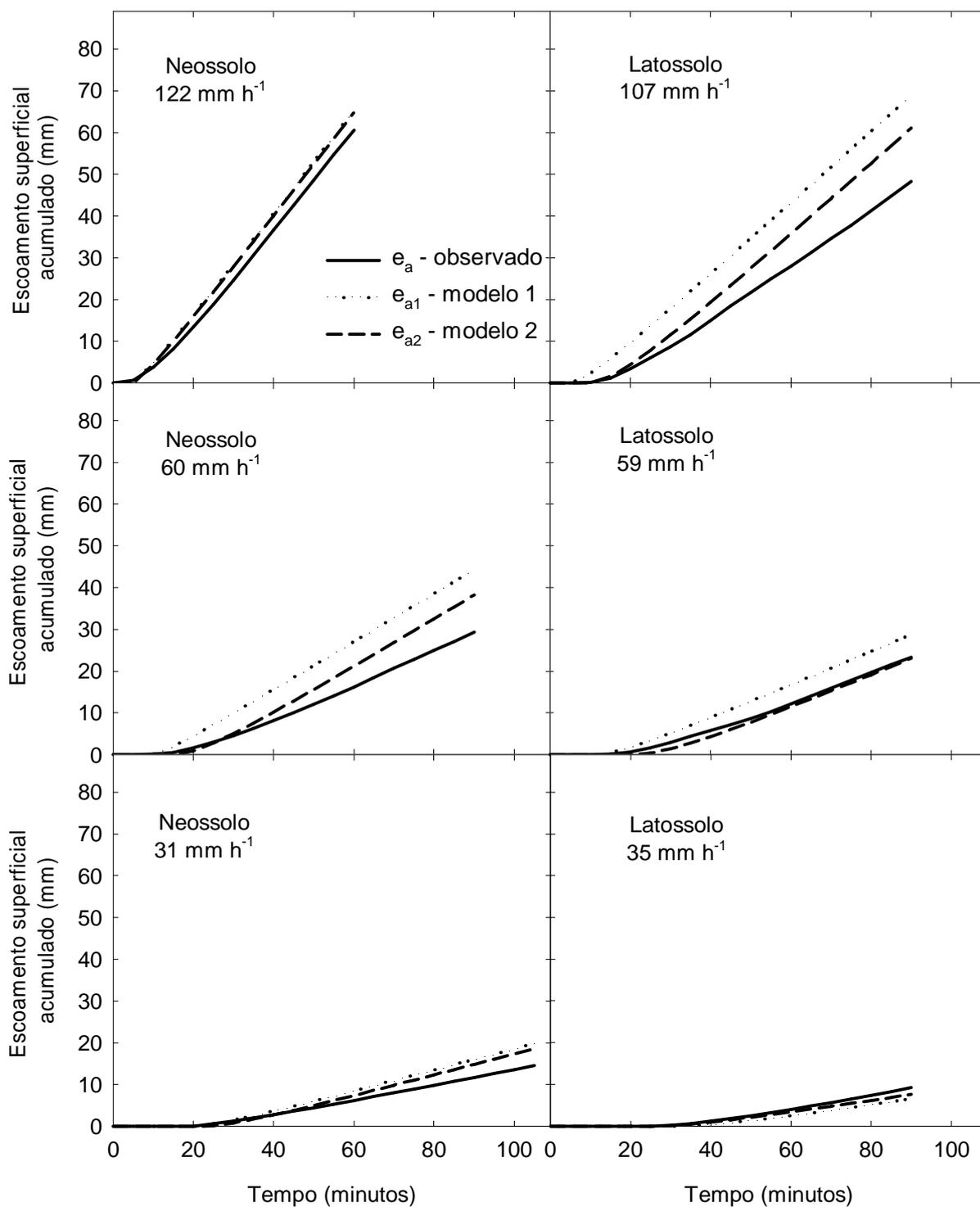
#### 4.11 Avaliação do modelo modificado de Smith – modelos 1 e 2 para o Rio Grande do Sul

Na figuras 25 e 26 são apresentados os valores de escoamento superficial acumulado observado e os valores estimados através do modelo 1 ( $e_{a1}$ ) e do modelo 2 ( $e_{a2}$ ), para os solos onde foram realizados os ensaios com chuva simulada no Rio Grande do Sul. A diferença entre os dois modelos está apenas na equação de estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ).

O escoamento superficial acumulado ( $e_a$ ) para os modelos 1 e 2 foi determinado através da equação 5. A taxa de escoamento superficial ( $e$ ) para os modelos 1 e 2 foi determinada através da equação 4. A taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) para os modelos 1 e 2 foi determinada através da equação 7. O valor do expoente “ $b$ ” para os modelos 1 e 2 foi determinado através da equação 9. O tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) para o modelo 1 foi determinado através da equação 14 e para o modelo 2 através da equação 11. Na equação 14 utilizou-se o valor de  $f_u = 2$  e 1, para a chuva 1 e 2, respectivamente.



**Figura 25-** Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para o Argissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 26-** Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 no Neossolo e Latossolo. Santa Maria, RS, 2007.

Para chuva 1 no Argissolo 1 (Figura 25) os valores médios do escoamento superficial acumulado (para as três intensidades de chuva) foram subestimados em 11 e 9%, para  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$ , respectivamente. Para chuva 2 houve uma subestimativa de 6 e 3%, para  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$ , respectivamente.

No Neossolo e Latossolo (Figura 26) os valores médios do escoamento superficial acumulado, obtidos com  $e_{a1}$ , foram superestimados em 24 e 29 %, respectivamente. Já os valores obtidos com  $e_{a2}$ , foram superestimados em 16 e 14%, respectivamente, para o Neossolo e Latossolo.

Para as intensidades mais elevadas de chuva simulada (em torno dos 120 mm h<sup>-1</sup>) o desempenho dos modelos de estimativa foi considerado bom. Considerando a média das quatro chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$  superestimaram os valores do escoamento superficial acumulado em 3,6 e 5,9%, respectivamente. Os piores desempenhos de  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$  foram observados no Latossolo com uma superestimativa de 20 mm (43%) e 13 mm (26%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a1}$  foi observado no Argissolo 1 (chuva 1) com uma subestimativa de 3 mm (4%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a2}$  foi observado no Argissolo 1 (chuva 1) com uma superestimativa de 2 mm (3%) no escoamento superficial acumulado.

Nas intensidades intermediárias de chuva simulada (em torno dos 60 mm h<sup>-1</sup>), o desempenho dos modelos de estimativa foi considerado satisfatório. Considerando a média das quatro chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a1}$  superestimou em 8,9% e  $e_{a2}$  subestimou em 3,5% os valores do escoamento superficial acumulado. Os piores desempenhos de  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$  foram observados no Neossolo com uma superestimativa de 15 mm (51%) e 9 mm (30%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a1}$  foi observado no Argissolo 1 (chuva 2) com uma subestimativa de 1 mm (3%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a2}$  foi observado no Latossolo com uma subestimativa de 0,3 mm (1%) no escoamento superficial acumulado.

Nas baixas intensidades de chuva simulada (em torno dos 30 mm h<sup>-1</sup>) o desempenho dos modelos de estimativa foi considerado satisfatório. Considerando a média das quatro chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$  subestimaram em 2,2 e 2,4%, respectivamente, os valores do escoamento superficial acumulado. Os piores desempenhos de  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$  foram observados no Neossolo com uma

superestimativa de 5 mm (36%) e 4 mm (28%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a1}$  foi observado no Argissolo 1 (chuva 1) com uma subestimativa de 9 mm (25%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a2}$  foi observado no Latossolo com uma subestimativa de 2 mm (17 %) no escoamento superficial acumulado.

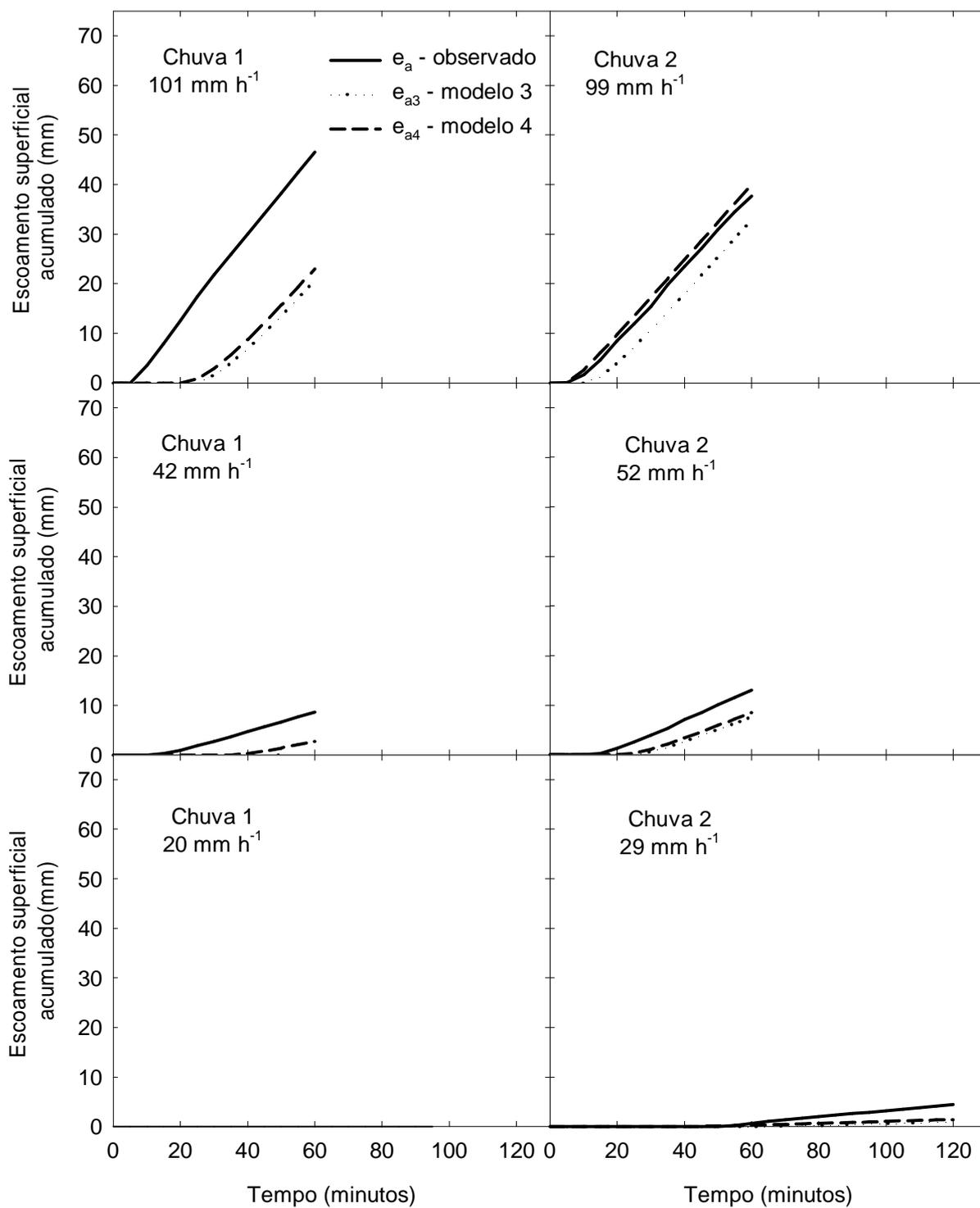
Os valores médios de escoamento superficial acumulado, para os três solos no Rio Grande do Sul, obtidos com  $e_{a1}$  e  $e_{a2}$ , foram superestimados em 4 e 2%, respectivamente. De um modo geral  $e_{a1}$  tem um melhor desempenho para as altas e baixas intensidades de chuva (em torno de 120 e 30 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente), enquanto que  $e_{a2}$  apresenta um melhor desempenho para as intensidades médias de chuva (em torno de 60 mm h<sup>-1</sup>). Além disso, o desempenho dos dois modelos de estimativa melhora com o aumento da intensidade de chuva.

#### 4.12 Avaliação do modelo modificado de Smith – modelos 3 e 4 para o Uruguai

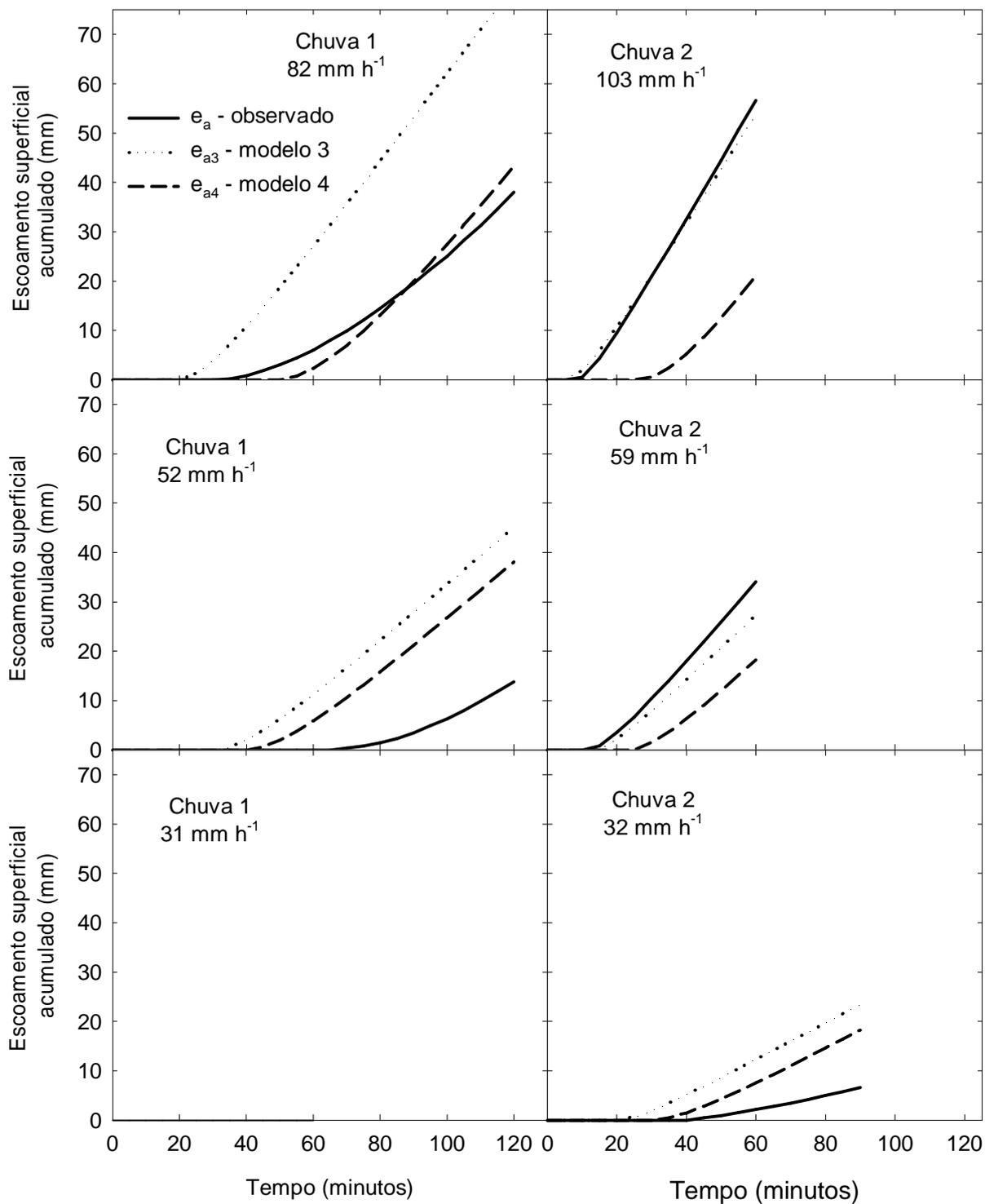
Na figuras 27, 28 e 29 são apresentados os valores de escoamento superficial acumulado observado e os valores estimados através do modelo 3 ( $e_{a3}$ ) e do modelo 4 ( $e_{a4}$ ), para os solos onde foram realizados os ensaios com chuva simulada no Uruguai. A diferença entre os dois modelos está apenas na equação de estimativa do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ).

O escoamento superficial acumulado ( $e_a$ ) para os modelos 3 e 4 foi determinado através da equação 5. A taxa de escoamento superficial ( $e$ ) para os modelos 3 e 4 foi determinada através da equação 4. A taxa constante de escoamento superficial ( $e_c$ ) para os modelos 3 e 4 foi determinada através da equação 8. O valor do expoente “ $b$ ” para os modelos 3 e 4 foi determinado através da equação 10. O tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ) para o modelo 3 foi determinado através da equação 15 e para o modelo 4 através da equação 12. Na equação 15 utilizou-se o valor de  $fu = 2$  e 1, para a chuva 1 e 2, respectivamente.

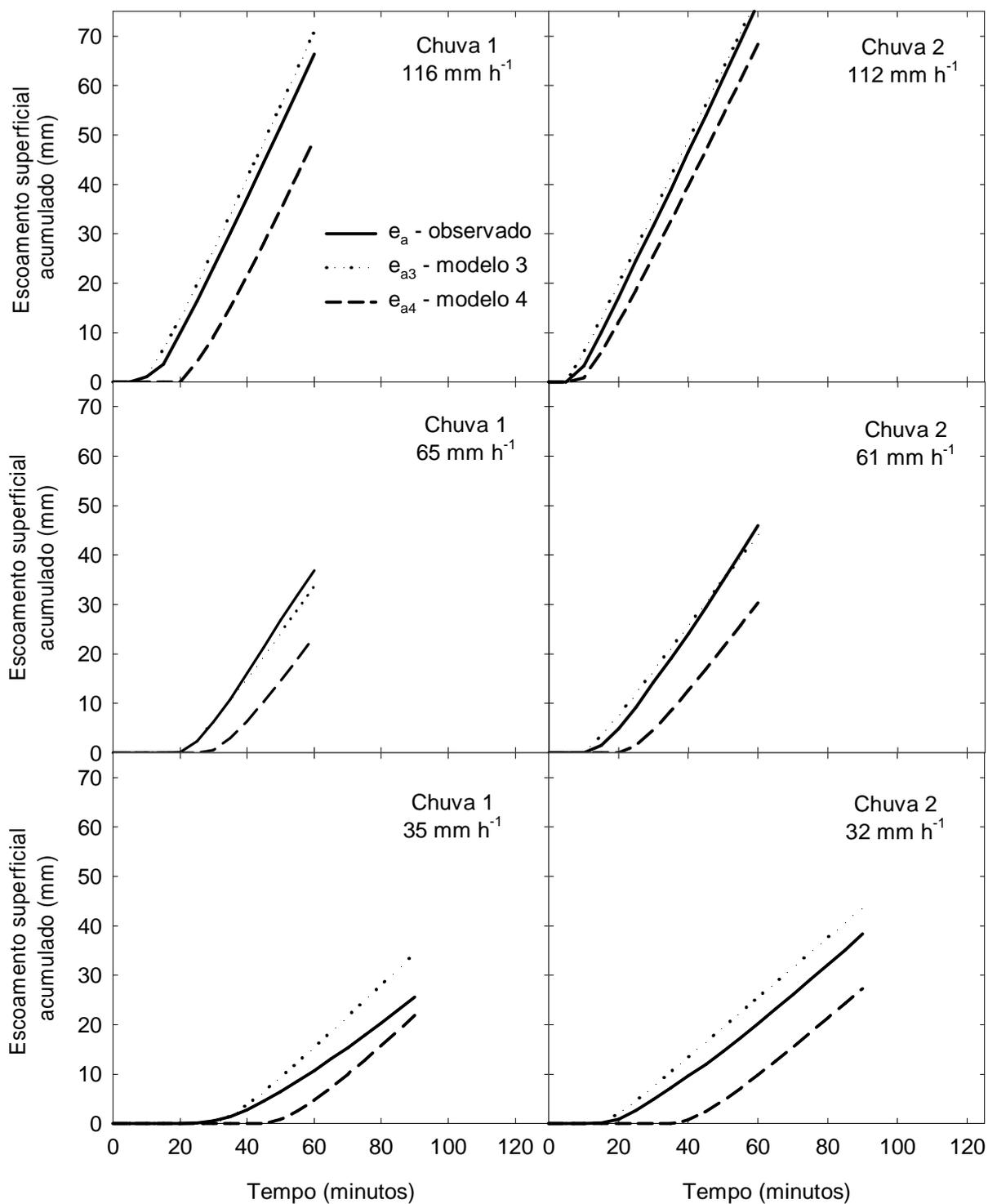
Não houve escoamento superficial para a chuva 1 no Argissolo 2 e Chernossolo, nas intensidades de chuva de chuva simulada de 20 e 31 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 27-** Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Argissolo 2. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 28-** Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Chernossolo. Santa Maria, RS, 2007.



**Figura 29-** Comparação entre os valores observados e estimados do escoamento superficial acumulado para a chuva 1 e 2 no Vertissolo 1. Santa Maria, RS, 2007.

Para chuva 1 no Argissolo 2 (Figura 27) os valores médios do escoamento superficial acumulado (para as três intensidades de chuva) foram subestimados em 63 e 53%, para  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$ , respectivamente. Para chuva 2 houve uma subestimativa de 25 e 9%, para  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$ , respectivamente.

Para chuva 1 no Chernossolo (Figura 28) os valores médios do escoamento superficial acumulado (para as três intensidades de chuva) foram superestimados em 141 e 57%, para  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$ , respectivamente. Para chuva 2 houve uma superestimativa de 7%, para  $e_{a3}$  e uma subestimativa de 41% para  $e_{a4}$ , respectivamente.

Para chuva 1 no Vertissolo 1 (Figura 29) o valor médio do escoamento superficial acumulado (para as três intensidades de chuva) foi superestimado em 8% para  $e_{a3}$  e subestimado em 27% para  $e_{a4}$ . Para chuva 2 houve uma superestimativa de 3%, para  $e_{a3}$  e uma subestimativa de 22% para  $e_{a4}$ , respectivamente.

Para as intensidades mais elevadas de chuva simulada (em torno dos 120 mm h<sup>-1</sup>) o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a3}$  foi considerado satisfatório e o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a4}$  ruim. Considerando a média das seis chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a3}$  superestimou em 5% e  $e_{a4}$  subestimou em 24%, os valores do escoamento superficial acumulado. O pior desempenho de  $e_{a3}$  foi observado no Chernossolo (chuva 1) com uma superestimativa de 42 mm (111%) no escoamento superficial acumulado. O pior desempenho de  $e_{a4}$  foi observado no Chernossolo (chuva 2) com uma subestimativa de 36 mm (63%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a3}$  foi observado no Vertissolo 1 (chuva 2) com uma superestimativa de 1 mm (2%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a4}$  foi observado no Argissolo 2 (chuva 2) com uma superestimativa de 2 mm (6%) no escoamento superficial acumulado.

Nas intensidades intermediárias de chuva simulada (em torno dos 60 mm h<sup>-1</sup>) o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a3}$  foi considerado satisfatório e o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a4}$  ruim. Considerando a média das seis chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a3}$  superestimou em 4% e  $e_{a4}$  subestimou em 20%, os valores do escoamento superficial acumulado. Os piores desempenhos de  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$  foram observados no Chernossolo (chuva 1) com uma superestimativa de 31 mm (226%) e 24 mm (175%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado. Os melhores desempenhos de  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$  foram observados no

Vertissolo 1 (chuva 2) com uma subestimativa de 2 mm (4%) e 16 mm (34%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado.

Nas baixas intensidades de chuva simulada (em torno dos 30 mm h<sup>-1</sup>) o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a3}$  foi considerado ruim e o desempenho do modelo de estimativa  $e_{a4}$  satisfatório. Considerando a média das seis chuvas com intensidades semelhantes,  $e_{a3}$  superestimou em 37% e  $e_{a4}$  subestimou em 8%, os valores do escoamento superficial acumulado. Os piores desempenhos de  $e_{a3}$  e  $e_{a4}$  foram observados no Chernossolo (chuva 2) com uma superestimativa de 17 mm (255%) e 12 mm (177%), respectivamente, nos valores do escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a3}$  foi observado no Vertissolo 1 (chuva 2) com uma superestimativa de 5 mm (14%) no escoamento superficial acumulado. O melhor desempenho de  $e_{a4}$  foi observado no Vertissolo 1 (chuva1) com uma subestimativa de 4 mm (15%) no escoamento superficial acumulado.

No Uruguai o modelo de estimativa do escoamento superficial acumulado  $e_{a3}$  apresentou um melhor desempenho para as intensidades de chuva alta e intermediária (em torno de 120 e 60 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente), principalmente em solos com elevada umidade inicial (chuva 2). O modelo de estimativa  $e_{a4}$  apresentou um bom desempenho para baixas intensidades de chuva (em torno de 30 mm h<sup>-1</sup>).

#### **4.13 Massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo e o escoamento superficial**

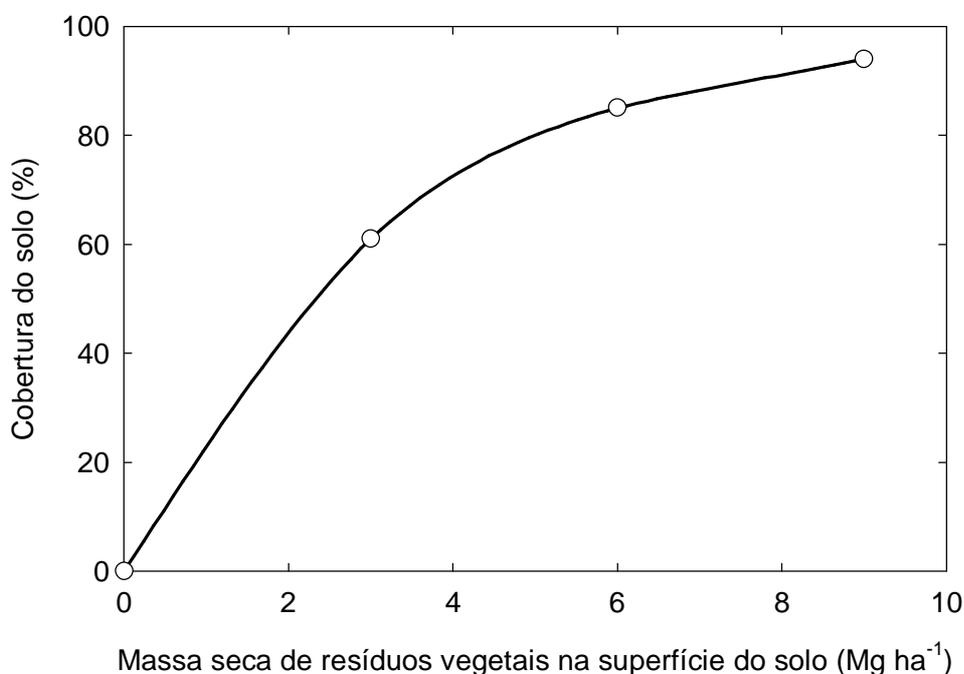
Os resíduos culturais quando mantidos sobre a superfície do solo evitam o impacto direto das gotas de chuva, prevenindo a desagregação e mantendo elevadas as taxas de infiltração de água no solo, além de reduzir a velocidade do escoamento superficial. A eficácia dos resíduos culturais no controle do escoamento superficial vai depender de vários fatores, entre eles a quantidade e a porcentagem de cobertura (AMADO et al., 1989). O efeito da cobertura do solo na redução da velocidade do escoamento superficial é explicado pela tortuosidade dos caminhos a serem percorridos pelo fluxo, imposta pelo resíduo, e pela barreira física proporcionada pelas partes constituintes do resíduo cultural, impedindo o livre escoamento da água (CARVALHO et al., 1990, NETO et al., 1988).

Diante do exposto é evidente a importância da presença da massa seca na redução das perdas por escoamento superficial. Na maioria dos solos onde foram aplicadas as chuvas simuladas a quantidade de massa seca e a porcentagem de cobertura do solo foram elevadas (Item 4.4, Tabela 6). Dessa forma a massa seca e a porcentagem de cobertura não se correlacionaram significativamente ou apresentaram uma relação incoerente com a taxa constante ( $e_c$ ) e o tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ), não sendo incluído no ajuste das equações de estimativa (Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 15). Presume-se que nos resultados obtidos o efeito da massa seca foi máximo no sentido de reduzir as perdas de água por escoamento superficial, restando complementar o modelo em caso de reduzida ou ausência de massa seca na superfície do solo. Nesse sentido, buscaram-se na literatura subsídios para incluir a massa seca no modelo de estimativa da taxa de escoamento superficial ( $e$ ).

Para VOLK et al. (2004), a semeadura direta, principalmente com pouca massa de resíduo cultural sobre a superfície e com camadas de solo mais consolidadas, necessita de especial atenção para reduzir as perdas de água por erosão hídrica, uma vez que as condições físicas da superfície do solo são desfavoráveis (baixa rugosidade e exposição ao impacto direto das gotas de chuva) à retenção e infiltração de água da chuva. SILVEIRA & SALVADOR (2000) testaram o efeito de quatro diferentes quantidades de massa seca de resíduos vegetais (Figura 30) sobre as perdas de água por escoamento superficial. Os autores observaram que o aumento da cobertura do solo reduzia as perdas já que a água permanecia mais tempo retida na palha, retardando o escoamento superficial e facilitando a infiltração. Os autores observaram que de 0 para 3 Mg h<sup>-1</sup> de massa seca a redução nas perdas de água foi de aproximadamente 70%. A partir dos 3 Mg h<sup>-1</sup> os efeitos da massa seca na redução das perdas de água foram bastante reduzidos. CASTRO et al. (2006) observaram que há um efeito significativo da rugosidade do terreno na redução das perdas por escoamento superficial sob reduzida quantidade de resíduos sobre o solo, no entanto, esse efeito é ocultado sob elevadas quantidades de resíduos.

A partir dos resultados adaptados de CARVALHO et al. (1990) e SILVA et al. (2001), apresentados na figura 31, observa-se que um incremento adicional na taxa de escoamento superficial ( $e$ ) poderá ocorrer quando a quantidade de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo for inferior a 3 Mg ha<sup>-1</sup> (80 % de cobertura

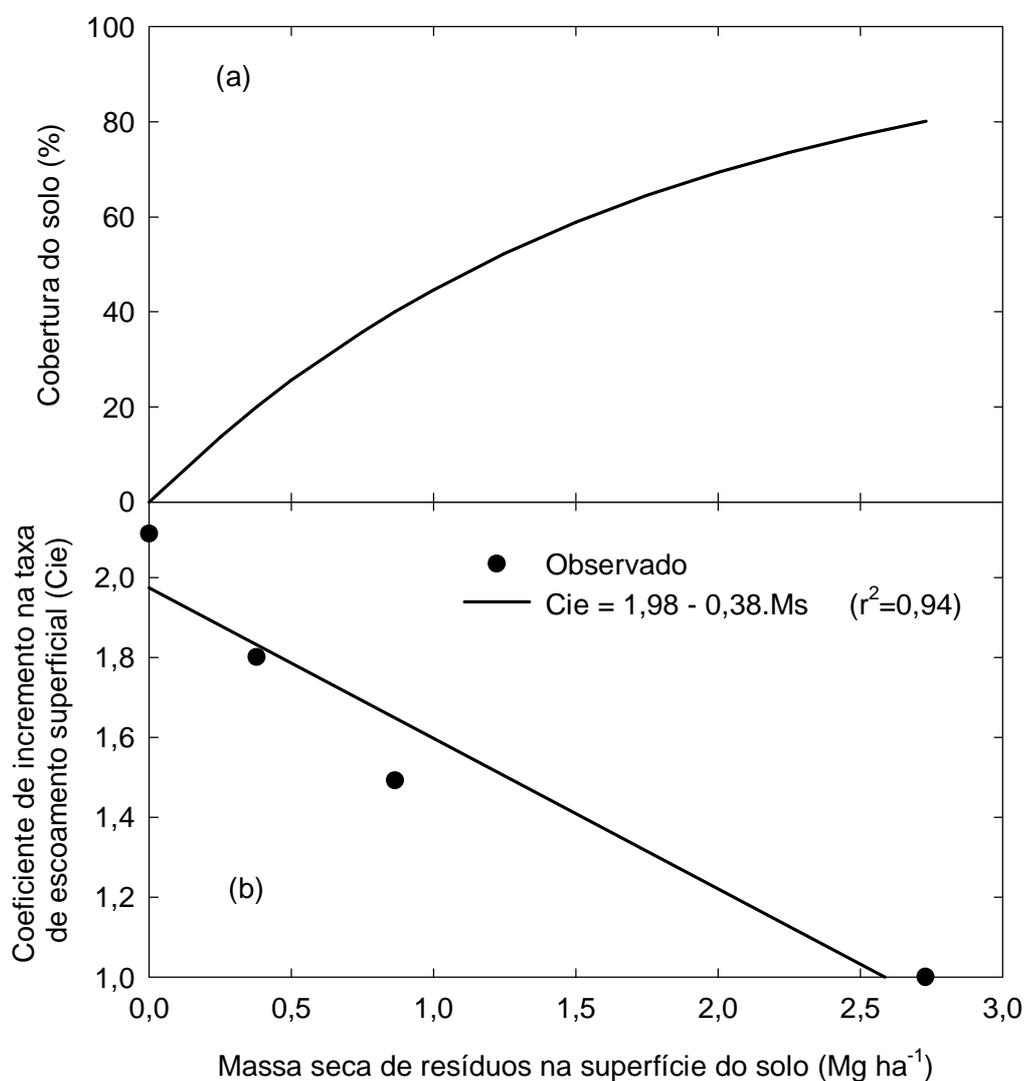
do solo). Esse acréscimo foi denominado de coeficiente de incremento na taxa de escoamento superficial ( $Cie$ ). O valor de  $Cie$  foi obtido a partir da razão entre as taxas de escoamento superficial, de um solo com cobertura menor que 80% e, de um solo 80% coberto (adaptado de SILVA et al., 2001). A relação entre cobertura do solo e massa seca de resíduos foi adaptada de CARVALHO et al. (1990). Um valor de  $Cie$  igual a 1,5 significa que a quantidade reduzida de massa seca na superfície do solo ( $1,27 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) contribui em 50% no aumento da taxa de escoamento superficial (quando comparado à quantidades superiores a  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de massa seca), independentemente dos demais fatores envolvidos.



**Figura 30-** Quantidade de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo e sua relação com a porcentagem de cobertura do solo (adaptado de SILVEIRA & SALVADOR, 2000). Santa Maria, RS, 2007.

Trabalhos com chuva simulada de diversos autores corroboram com as aproximações feitas na figura 31b. ALVES & CABEBA (1999) compararam as perdas de água por escoamento superficial em dois sistemas de cultivo, plantio direto e convencional e a partir desses resultados, calculou-se um  $Cie$  médio de 1,95. BRANDÃO et al. (2003) comparou as perdas de água em três tipos de cobertura vegetal (vegetação espontânea, mucuna e milho) e com o solo descoberto e a partir desses resultados, calculou-se um  $Cie$  médio de 1,60. SILVA & KATO (1997)

estudaram as perdas de água em solo com e sem cobertura de cerrado, a partir dos seus resultados obteve-se um  $Cie$  de 2,09. BRITO et al. (1996) determinaram a taxa de infiltração em solo nu e com cobertura vegetal ( $7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) sob diferentes intensidades de chuva, a partir dos seus resultados calculou-se um  $Cie$  médio de 2,63.



**Figura 31-** Quantidade de massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo (MS) e sua relação com a porcentagem de cobertura (adaptado de CARVALHO et al., 1990) e o coeficiente de incremento na taxa de escoamento superficial –  $Cie$  (adaptado de SILVA et al., 2001). Santa Maria, RS, 2007.

A partir dos resultados apresentados na figura 31b, o valor de  $Cie$  pode ser calculado pela equação:

$$Cie = 1,98 - 0,38MS \quad (16)$$

onde,  $Cie$  é o coeficiente de incremento na taxa de escoamento superficial e  $MS$  é massa seca de resíduos vegetais sobre a superfície do solo em  $Mg\ ha^{-1}$ .

Assim, quando a massa seca de resíduos vegetais na superfície do solo for inferior a  $3\ Mg\ ha^{-1}$ , recomenda-se que a taxa de escoamento superficial (equação 4) seja multiplicada pelo valor de  $Cie$ . Dessa forma, o modelo modificado de Smith pode ser expresso da seguinte forma:

$$e = e_c \times \left\{ 1 - \left( \frac{t_e}{t} \right)^b \right\} \times Cie, \text{ para } t > t_e \quad (17)$$

onde,  $e$  é a taxa de escoamento superficial no tempo  $t$ ;  $e_c$  é a taxa constante de escoamento superficial em  $mm\ h^{-1}$ ;  $t_e$  é o tempo de início de escoamento da água sobre a superfície do solo em minutos;  $t$  é o tempo após o início do escoamento superficial em minutos;  $b$  é o parâmetro de ajuste do modelo. Quando a massa seca de resíduos vegetais sobre a superfície do solo for superior a  $3\ Mg\ ha^{-1}$ , o valor de  $Cie$  deve ser igual a 1.

## 5 CONCLUSÕES

O aumento da umidade inicial do solo reduz o tempo de início do escoamento superficial. A umidade inicial do solo não influencia na taxa constante de escoamento superficial;

A textura do solo, independentemente das demais variáveis (declividade do terreno, massa seca na superfície e cobertura do solo, densidade (do solo e de partícula), porosidade do solo (macro, micro e total), umidade inicial e de saturação do solo.), não explica as perdas de água por escoamento superficial. A elevada porosidade total, reduzida densidade do solo e a manutenção da palha sobre a superfície do solo reduzem as perdas de água por escoamento superficial no Rio Grande do Sul, independentemente da textura do solo.

A estimativa da taxa constante de escoamento superficial, através de equações multivariadas contendo as variáveis intensidade da chuva, declividade do terreno e porosidade total do solo foi satisfatória para o Rio Grande do Sul. A estimativa da taxa constante de escoamento superficial, através de equações multivariadas contendo as variáveis intensidade da chuva, fração de argila e de areia presente no solo foi satisfatória para o Uruguai.

O modelo modificado de Smith estima satisfatoriamente as perdas de água por escoamento superficial para o Rio Grande do Sul e para o Vertissolo 1 (Uruguai). O seu desempenho foi melhor sob condições de elevada umidade do solo.

O modelo modificado de Smith pode ser utilizado para determinação do escoamento superficial em áreas agrícolas no Rio Grande do Sul e no Vertissolo 1 (Uruguai), desde que, as variáveis utilizadas nas equações de regressão multivariadas não excedam os valores máximos e mínimos observados.

Para trabalhos futuros, relacionados a esse tema e que tenham como objetivo melhorar o ajuste dos modelos propostos, recomenda-se que sejam realizadas chuvas simuladas sob diferentes declividades do terreno e massa seca de resíduos vegetais sobre a superfície, em um mesmo solo (com as mesmas características de manejo e de física do solo). Assim, será possível identificar o efeito individual das duas variáveis sobre as perdas de água por escoamento superficial. Ainda, recomenda-se, na medida do possível, realizar esses testes com chuva simulada sob diferentes condições de umidade inicial do solo, para observar os efeitos desta variável no tempo de início do escoamento superficial.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. 2000. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, p.754-761, 1999.

AMADO, T.J.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa do manejo do resíduo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n.2, p.251-257, 1989.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, A.E; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.35-43, 1999.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2002, 6 ed. 565 p.

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, v.46, p.1-36, 1991.

BRAIDA, J.A. **Relação da erosão entressulcos, com resíduos em cobertura e erosão em sulcos em solo podzólico vermelho-escuro**. 1994. 152f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.P.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa:, 2 ed. UFV, 2003. 98p.

BRITO, L.T.L.; et al. Influência do método na determinação da velocidade de infiltração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.503-507, 1996.

CARLESSO. R.; ZIMMERMANN, F.L. **Água no solo: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM, 2000. 88p.

CARVALHO, F.L.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.227-234, 1990.

CASSOL, E.A.; et al. Infiltração de água e perdas de água e solo por erosão influenciadas por diferentes métodos de melhoramento da pastagem nativa gaúcha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.23, p. 923-931, 1999.

CASTRO, O.M. Cultivo mínimo e propriedades físicas do solo. In: 1º Seminário sobre Cultivo Mínimo do Solo em Florestas, 1995. **Anais...**, IPEF, Curitiba, PR. 1995.

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, L.B.S. Interações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.30, p. 339-352, 2006.

COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.743-753, 2003.

DAKER, A. **A água na agricultura: irrigação e drenagem**. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984. v.3, 543p.

DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25.1974. 68p.

DE MARIA, I.C., CASTRO, O.M., DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.703-709, 1999.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. USA, Decagon devices, 2000. 70 p.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A. Pesquisa de desenvolvimento em sistema plantio direto no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Londrina: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991. 268p.

DOURADO NETO, D.; et al. Programa para confecção da água utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, v.1, p.93-101, 1990.

DURAN, A. **Los suelos del Uruguay**. Montevideo, Ed. Emisferio Sur., 1991, 400p.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, p.15-37, 1979.

FEPAGRO. Manejo e conservação de solo. In: Reunião da Comissão Sul-brasileira de Pesquisa do Trigo, 2001, Passo Fundo. **Anais eletrônicos...** Passo Fundo, 2001.

Disponível em: <<http://www.fepagro.rs.gov.br/soja/indi/01manejo.htm>>. Acesso em 20 de mar. de 2004.

FONSECA, E.O.; CASSOL, E.A. . Enxurrada, infiltração de água e perdas por erosão em um latossolo vermelho, em sistemas de manejo do solo. In: XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá-MT: SBCS, 2002.

GARCIA, S.M. **Mulching vertical e manejo da água em sistema plantio direto**. 2005. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. **Particle-size analysis**. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy. 1986.

GRH. **Apostila de Hidrologia**. Grupo de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <<http://www.grh.ufba.br/pgHidrologia.htm>>. Acessado em 15 de out. de 2006.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.213-218, 2002.

HERSHFIELD, D.M. Effective rainfall and irrigation water requirements. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York, v.90, p.33-47, 1964.

HILLEL, D. **Solo e água, fenômenos e princípios físicos**. Tradução UFRGS-USAID/Wisconsin. Departamento de Solos, UFRGS. Porto Alegre. 1970. 231p.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. Academic Press, Orlando, 1980. 413p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. 771p.

JOHN, L. **Onu quer mais eficiência na irrigação**. 2003 <[http://www.estadao.com.br/ext/ciencia/agua/negociacoesde2003\\_7.htm](http://www.estadao.com.br/ext/ciencia/agua/negociacoesde2003_7.htm)>. Acessado em 14 de junho de 2004.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

KIEHL, J.E. **Manual de edafologia**. São Paulo, SP. Agronômica Ceres, 1979. 262p.

LOMBARDI NETO, F.; et al. Efeito da quantidade de resíduos culturais de milho nas perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.71-75, 1988.

LOPES, P.R.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.71-75, 1987.

MANNERING, J.V.; MEYER, L.D. The effect of various rates of surface mulch an infiltration and erosion. **Soil Science Society of American Proceeding**, v.27, n.1, p.84-6, 1963.

MARQUES, G.G.M. **Topografia : fundamentos básicos**. Imprensa da UFSM, Santa Maria.1978. 322p.

MEHL, H. U. **Caracterização de padrões de chuvas ocorrentes em Santa Maria (RS) e sua relação com as perdas de solo e água em entressulcos**. 2000. 53f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

MENEGHETI, G. Irrigação para gerar riqueza de norte a sul do Brasil. **A Granja**, n.647, p. 14-20, 2002.

MEROTTO, A.J.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Revista Ciência Rural**, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

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 da depressão central (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.4, p.1041-1051, 2001.

NETO, F.L.; et al. Efeito da quantidade de resíduos culturais de milho nas perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.12, p. 71-75, 1988.

NORTON, L.D.; BROWN, L.C. Time-effect on water erosion for ridge tillage. **Transactions of the ASAE**, v. 35, p.473-478,1992.

PRUSKI, F.F. **Aplicação de modelos físicomatemáticos para a conservação de água e solo**. In: SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. (Coord.). Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura. Viçosa, MG: UFV, 1997.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2003. 88p.

REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole Ltda, 1990.

REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.289-298, 1992.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. **Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado**. In: CARLESSO, R.; et al. (eds). Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2001, 165p.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil Science**, v. 58, p.95-112, 1949.

RICHART, A.; et al. **Compactação do solo: causas e efeitos**. Seminário: Ciências Agrárias, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005

ROMERO, A.L.; GRAÑA, R.C. Modelos para el cálculo de la lluvia efectiva y su aplicación en caña de azúcar. **Caña de Azúcar**, v.17(única), p.3-20, 1999

ROSA, G.M.; PETRY, M.T.; CARLESSO, R. Disponibilidade, eficiência e racionalidade na utilização de recursos hídricos. **Revista Ciência e Ambiente**, n.21, p.103-118, 2000.

SALES, L.E.O.; et al. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p. 313-319, 1995.

SAMPAIO, S.C.; et al. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p. 210-213, 2000.

SCHAEFER, C.E.R.; et al. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SEGUÍ, J.P.; et al. **Riego y drenaje**. Ed. Pueblo y Educación: Havana, Cuba. 1995. 414p.

SHAW, R.H. Prediction of soil moisture under meadow. **Agronomy Journal**, v. 56(3), p. 320-324, 1964.

SILVA, C.L.A.; RAMOS, M.M.; FERREIRA, P.A., et al. Modelagem da precipitação efetiva na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.6, p.929-937, 1994.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

SILVA, V. R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, D. D.; et al. Escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num podzólico vermelho amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.1, p.1222, 2001

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171f. Tese. (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

SILVEIRA, R.C.; SALVADOR, N. Uso de simulador de chuva no estudo de perdas de solo e água em parcelas com resíduos culturais de milho. **Ciência Agrotécnica**, v.24, n.3, p.718-729, 2000.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.240-244, 2003.

STORCK, L.; et al. **Experimentação vegetal**. Santa Maria: Ed. UFSM 1, 198p. 2000.

STRECK, E.V.; et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2002. 107p.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, p.873-882, 1984.

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P.; STRECK, E.V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.763-774, 2004.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the ASAE.**, v.4, p.242-246, 1966.

WALLACE, J. S.; BATCHELOR, C. H. Managing water resources for crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Science** v.352, p.937-947, 1997.

WILDNER, L.P. **Efeito da adição de diferentes resíduos orgânicos nas perdas de solo e água em um solo Podzólico Vermelho Amarelo**. 1985. 100 f. Dissertação (Mestrado em Biodinâmica dos Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1985.

ZIMMERMANN, F.L. **Crescimento de plantas de milho e armazenamento de água no solo em dois sistemas de cultivo**. 2001. 101f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.