

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

**ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM
DIFERENTES NÍVEIS DE DOSSEL VEGETATIVO E
COBERTURA DO SOLO**

TESE DE DOUTORADO

Alberto Eduardo Knies

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM
DIFERENTES NÍVEIS DE DOSSEL VEGETATIVO E
COBERTURA DO SOLO**

Alberto Eduardo Knies

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

Orientador: Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com dados fornecidos pelo autor.

Knies, Alberto Eduardo

Estimativa do escoamento superficial em diferentes níveis de dossel vegetativo e cobertura do solo / Alberto Eduardo Knies.-2014.

121 p. ; 30cm

Orientador: Reimar Carlesso

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2014

1. Palha 2. Declividade do terreno 3. Chuva efetiva
4. Método Curva Número 5. Equações Multivariadas I.
Carlesso, Reimar II. Título.

© 2014

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

Endereço: Campus da UFSM, Rua Q, Prédio 68, Camobi, Santa Maria, RS, CEP 97105-900.
Fone: (55) 3220 8399; E-mail: albertoek@gmail.com

**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**

**ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM DIFERENTES
NÍVEIS DE DOSSEL VEGETATIVO E COBERTURA DO SOLO**

elaborada por
Alberto Eduardo Knies

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

COMISSÃO EXAMINADORA:



PhD. Reimar Carlesso
Presidente/Orientador UFSM



PhD. Flávio L. F. Eltz (UFSM)



Dra. Mirta T. Petry (UFSM)



Dr. Cleudson J. Michelon (IFFarroupilha - Câmpus Júlio de Castilhos)



Dr. Juliano D. Martins (Fepagro)

Santa Maria, 25 de março de 2014.

Primeiramente à Deus, pela vida e saúde.

À minha esposa Zanandra, pelo seu carinho e amor, por compreender, incentivar e auxiliar.

À meu filho Antônio, que encheu de luz e alegria minha vida,

À meus pais, Adair e Nivea, que sempre me incentivaram e apoiaram as minhas decisões.

DEDICO este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pela saúde e por iluminar meu caminho e minhas decisões.

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita.

Ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela possibilidade de realização deste curso e pela bolsa de estudos concedida.

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

Aos membros da banca examinadora, profs. Flávio Eltz, Mirta, Cleudson e Juliano, pelas sugestões dadas e considerações feitas, e aos professores que ministraram as aulas no decorrer do Curso, pelos ensinamentos e disponibilidade de tempo sempre que necessário.

Ao professor Luis Santos Pereira, pela amizade e co-orientação, importantes para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas de pesquisa: Juliano D. Martins, Maria Gabriela G. Piñango, Anderson L. Zwirtes, Geraldo Rodrigues, Luís F. Grasel, Vinícius Dubou, Henrique M. Fries, Núbia P. Aires, Júlio C. Gatto e Jonas R. Henckes. A vocês, meu muito obrigado, pois cada número apresentado nesta tese também foi fruto de seu trabalho e dedicação.

À minha esposa, Zanandra Boff de Oliveira, pelo auxílio nos trabalhos de pesquisa e, sobretudo, pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e companheirismo.

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais Adair e Nívea, pelo carinho, incentivo, apoio e confiança.

A todos aqueles que, de uma ou outra maneira, ajudaram na realização deste trabalho.

A todos, meu eterno agradecimento e carinho.

RESUMO

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

ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM DIFERENTES NÍVEIS DE DOSSEL VEGETATIVO E COBERTURA DO SOLO

Autor: Alberto Eduardo Knies
Orientador: Reimar Carlesso
Santa Maria, 25 de março de 2014.

Os sistemas de manejo do solo modificam o seu balanço hídrico e para o correto manejo da irrigação é de fundamental importância a determinação do escoamento superficial e da chuva efetiva, o que contribui para maximizar o uso da água das chuvas e minimiza a utilização de irrigação suplementar. O objetivo do presente trabalho foi determinar, modelar e estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo de desenvolvimento das culturas do feijão e milho, cultivados em solo com e sem palha na superfície, em diferentes declividade do terreno e intensidades de chuvas simuladas, utilizando experimentos a campo, equações multivariadas, o método Curva Número (CN) e o modelo SIMDualKc. Foram realizados dois experimentos à campo, com as culturas do feijão e milho, em que foram aplicadas diferentes intensidades de chuvas simuladas (35, 70 e 105 mm h⁻¹), em diferentes momentos do ciclo das culturas (cobertura do solo de 0, 28, 63 e 100% pelo dossel vegetativo do feijão; 0, 30, 72 e 100% pelo dossel vegetativo do milho) e distintas declividade do terreno (1, 5 e 10%), em solo sem e com (5 Mg ha⁻¹) palha de aveia preta na superfície. Os valores de escoamento superficial observados foram comparados com os estimados pelo método CN, sugerindo-se novos valores de CN para melhorar a estimativa. A partir do conjunto de dados coletados a campo, foram realizadas análises de regressão linear múltiplas para a estimativa do escoamento superficial e, simulações com o modelo SIMDualKc para estimativa do escoamento superficial e da chuva efetiva. O tempo de início do escoamento, a taxa constante de escoamento, o escoamento total e a porcentagem de escoamento em relação ao volume da chuva foram pouco influenciados pelo crescimento do dossel vegetativo das plantas de feijão e milho. Reduções no escoamento superficial foram proporcionadas pela presença de palha na superfície do solo, em até 45 e 48% para as culturas do feijão e milho, respectivamente. O método CN para a cultura do feijão subestimou o escoamento superficial em até 10% para o solo sem palha na superfície e, superestimou em até 17% para o solo com palha. Para a cultura do milho, o método CN superestimou o escoamento superficial em até 32,4% no solo com palha e 12% no solo sem palha. Para melhorar a estimativa do método CN, foram propostos novos valores de CN, considerando a cultura, a presença ou não de palha na superfície do solo e a intensidade da chuva. A utilização de análises de regressão linear múltiplas indicaram que o volume da chuva ($R^2=0,52$) e a cobertura do solo por palha ($R^2=0,18$) são as variáveis com maior influência sobre o escoamento superficial. Foram geradas quatro equações múltiplas, sendo que a equação 2, cujos parâmetros de entrada são o volume da chuva e quantidade de palha na superfície do solo, foi a que apresentou a melhor estimativa do escoamento superficial de um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem. O modelo SIMDualKc necessita de ajustes para estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo das culturas de feijão e milho, de modo que considere os benefícios da palha na superfície do solo na redução do escoamento superficial. Desta forma, o valor sugerido de CN (CN=75) foi alterado para 71 e 87 para a cultura do feijão e, 56 e 79 para a cultura do milho, para o solo com e sem palha na superfície, respectivamente.

Palavras-chave: Palha. Declividade do terreno. Chuva simulada. Chuva efetiva. Método Curva Número. Equações Multivariadas. Modelo SIMDualKc.

ABSTRACT

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

RUNOFF ESTIMATE AT DIFFERENT LEVELS OF CANOPY VEGETATIVE AND SOIL COVER

Author: Alberto Eduardo Knies
Advisor: Reimar Carlesso
Santa Maria, March, 25th, 2014.

The soil tillage systems modify its water balance and for the correct irrigation management is fundamental to determining the runoff and effective rainfall, which helps to maximize the use of rainwater and minimizes the use of supplemental irrigation. The objective of this study was to determine, model and estimate the runoff and the effective rainfall during the development cycle of the common black bean and maize in soil with and without straw on the surface, in different land slope and rainfall intensities simulated, using the field experiments, multivariate equations, the Curve Number Method (CN) and the SIMDualKc Model. Two experiments were conducted in the field with crops of black beans and maize, where different intensities of simulated rainfall (35, 70 and 105 mm h⁻¹) were applied at different times of the crop cycle (soil cover of 0, 28, 63 and 100% by the canopy beans; 0, 30, 72 and 100% by canopy of maize) and distinct land slope (1, 5 and 10%) in soil without and with (5 Mg ha⁻¹) of oat straw on the surface. The runoff values observed were compared with those estimated by the CN method, suggesting new values of CN to improve the estimate. From the set of data collected from the field analysis of multiple linear regression to estimate runoff and simulations with SIMDualKc model to estimate runoff and effective rainfall were performed. The start time of the runoff, constant runoff rate, total runoff and the percentage of runoff in relation to the volume of rain were little influenced by the crops of beans and maize. Reductions in runoff were provided by the straw on the soil surface within 45 and 48% for the crops beans and maize, respectively. The CN method for the bean crop underestimated runoff by up to 10% for the soil without straw on the surface, and overestimated by up to 17% for the soil with straw. For maize, the method overestimated the runoff by up 32.4% in soil with straw and 12% in soil without straw. To improve estimation the CN, new values are proposed for CN, considering the crop, the presence or absence of straw on soil surface and intensity rain. The use of multiple linear regression analyzes indicated that the volume of precipitation ($R^2=0.52$) and soil cover by straw ($R^2=0.18$) are the variables with the greatest influence on runoff. Four multiple equations were generated, and the equation 2, whose input parameters are the volume of rain and amount of litter on the soil surface, was presented the best estimate of the runoff of a data set than the one that gave its origin. The SIMDualKc Model requires adjustments to estimate runoff and effective rainfall during the crop cycle of beans and maize, so consider the benefits of straw on the soil surface in reducing runoff. Thus, the suggested value of CN (CN=75) was changed to 71 and 87 to the black bean crop, and 56 and 79 for the maize crop for the soil with and without straw on the surface, respectively.

Keywords: Straw. Land slope. Simulated rainfall. Effective rain. Curve Number Method. Multiple Linear Regression. SIMDualKc Model.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Chuva efetiva	13
3.2 Fatores que interferem na chuva efetiva	13
3.2.1 Características da chuva	13
3.2.2 Cobertura da superfície do solo	15
3.2.3 Declividade da superfície do solo.....	18
3.3 escoamento superficial	20
3.4 Estimativa do escoamento superficial pelo Método Curva Número	21
3.5 Análise de equações multivariadas para a modelagem do escoamento superficial	22
3.6 Modelo SIMDualKc para a estimativa da chuva efetiva	23
4. ARTIGO 1: DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DURANTE O CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO ...	26
5. ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DURANTE O CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO MILHO	47
6. ARTIGO 3: MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL A PARTIR DA COBERTURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO, DA DECLIVIDADE DO TERRENO E DO VOLUME DE CHUVA	66
7. ARTIGO 4: ESTIMATIVA DA CHUVA EFETIVA PARA AS CULTURAS DO FEIJÃO E MILHO UTILIZANDO O MODELO SIMDualKc	83
8. DISCUSSÃO	107
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
REFERÊNCIAS	113

INTRODUÇÃO

A conservação da água constitui um aspecto de grande relevância para uma produção agrícola mais sustentável. Assim, a busca de tecnologias e informações que contribuam para um adequado manejo do solo e do uso da água se fazem cada vez mais necessários.

O manejo adequado da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto. Em regiões em que os sistemas de irrigação são utilizados para atender toda a demanda hídrica da cultura, o manejo da irrigação consta basicamente na reposição da evapotranspiração da cultura. Contudo, nas regiões em que a irrigação é suplementar a chuva, como é o caso do Estado do Rio Grande do Sul, a estimativa do consumo de água das plantas ainda apresenta muitas incertezas, especialmente decorrentes da aleatoriedade das condições meteorológicas e de manejo do solo. Neste caso, uma das maiores complexidades do manejo da irrigação é a determinação da parcela da chuva que será aproveitável pela cultura, conceituada como chuva efetiva, que corresponde à parcela da chuva total que é utilizada para atender as necessidades hídricas das culturas durante o seu ciclo de desenvolvimento.

Neste sentido, estudos sobre a chuva efetiva, para fins de manejo da irrigação, são de suma importância para a maximização do uso da água das chuvas naturais, minimizando a utilização de irrigação suplementar e, com isso, reduzindo os custos da irrigação e contribuindo para a conservação da água. Na área de produção agrícola, a chuva efetiva foi definida primeiramente por Hayes;Buell, citados por Dastane (1974) como sendo a chuva total menos o escoamento superficial e a evaporação. Todavia, o conceito proposto por Dastane (1974), define como sendo a chuva total menos as perdas por escoamento superficial e percolação profunda e a variação de umidade no solo. Sendo assim, vários fatores influem na porção efetiva da chuva total, os quais podem atuar isoladamente ou interagindo com outros, tais como: fatores relacionados à chuva (quantidade, frequência e intensidade), às propriedades físicas do solo, a umidade antecedente no solo, declividade do terreno, rugosidade superficial, porcentagem de cobertura do solo, entre outros.

Sobre os fatores relacionados à chuva, estudos confiáveis com chuva natural requerem vários anos de medidas para obter uma amostragem representativa. Além disso, a natureza irregular da chuva natural impede a intensiva coleta de dados. Assim, para possibilitar estudos em períodos mais curtos e com maior controle das intensidades da chuva pode-se utilizar chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001; ELTZ et al., 2001), como é o caso dos trabalhos desenvolvidos recentemente por Huang et al. (2013) e Oliveira et al. (2013).

Em função dos diferentes sistemas de manejo de solo empregados na produção agrícola, estudos envolvendo a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo e as alterações das características do escoamento estão sendo desenvolvidos (CASSOL et al., 2004; BERTOL et al., 2008, OLIVEIRA et al., 2013, DELAUNE; SIJ, 2012), assim como avaliações nas alterações do escoamento em diferentes situações de cobertura vegetal (SRIWONGSITANON; TAESOMBAT, 2011; BERTOL et al., 2008). Todavia, estudos com culturas anuais para fins de manejo de irrigação são inexistentes. Tal abordagem é levantada no presente trabalho com as culturas do feijão e milho, tendo em vista a importância destas culturas em áreas irrigadas por aspersão no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com Melo (2006), em solos irrigados por aspersão no RS, os cultivos de milho e feijão são predominantes durante a safra de verão e, no cultivo da safrinha, as culturas predominantes são o feijão e a soja.

Mundialmente, o Método da Curva Número (CN) é utilizado para estimar o escoamento superficial (JACOBS; SRINIVASAN, 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al. 2013). Desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA), baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (MISHRA; SINGH 2003; TYAGI et al., 2008). Contudo, para estimativas mais precisas do escoamento superficial, essa metodologia tem sido ajustada para as diferentes condições da superfície do solo, tanto em relação ao tipo de vegetação e cobertura do solo quanto à declividade do terreno. Estudos neste sentido estão sendo desenvolvidos no Brasil (ARAÚJO NETO et al., 2012), nos Estados Unidos (JACOBS; SRINIVASAN, 2005),

na China (HUANG et al., 2006), no Irã (EBRAHIMIAN et al., 2012), na Índia (DESHMUKH et al., 2013), entre outros.

Conforme se pode observar, a estimativa do escoamento superficial pela metodologia CN é bem abordada e de ampla utilização. Contudo, existem fatores que influenciam o escoamento superficial e que não estão contemplados no método, necessitando de ajustes. Além disso, a percolação profunda é de difícil determinação, o que dificulta a obtenção da chuva efetiva em nível de campo. Neste sentido, modelos de simulação de balanço hídrico do solo podem ser utilizados como ferramentas para a estimativa da chuva efetiva e da necessidade hídrica dos cultivos, como é o caso do modelo SIMDualKc, descrito por Rosa et al. (2012).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a avaliação da chuva efetiva a partir do conhecimento de fatores relacionados à chuva, a declividade do terreno e diferentes situações de cobertura da superfície do solo pelo dossel das culturas (feijão e milho) e por palha. Desta forma, melhorando a estimativa das necessidades hídricas dos cultivos, contribuindo para o planejamento da irrigação e o uso eficiente da água na produção agrícola.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Determinar e modelar o escoamento superficial de água no solo e estimar a chuva efetiva em diferentes momentos do ciclo de desenvolvimento das culturas do feijão e milho, considerando a presença de palha na superfície do solo, diferentes declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar e caracterizar as perdas de água por escoamento superficial do solo em diferentes situações de cobertura do solo por palha e pelas culturas do feijão e milho, declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas;
- Comparar as medidas do escoamento superficial com os valores estimados pelo método CN;
- Propor ajustes no método CN para diferentes intensidades de chuvas e situações de cobertura do solo;
- Modelar o escoamento superficial através de equações multivariadas;
- Estimar a chuva efetiva para as diferentes situações de estudo utilizando o modelo de balanço hídrico SIMDualKc.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3 Chuva efetiva

O termo precipitação efetiva ou chuva efetiva tem diversas interpretações, nas diferentes especialidades. Na agricultura, é definido como a parte da chuva que fica armazenada no solo até a profundidade efetiva das raízes das plantas e disponível para os cultivos, ou seja, é a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas, como escoamento superficial, percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008).

A chuva efetiva 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, no dimensionamento das obras e dos sistemas de irrigação (ROMERO; GRANÃ, 1999; SILVA et al., 1994; RAHMAN et al., 2008; CHEN et al., 2013). A estimativa adequada da chuva efetiva auxilia o irrigante a alcançar expressiva economia de água e energia, contribuindo com o aumento da lucratividade da atividade (SAMPAIO et al., 2000; CHEN et al., 2013).

Vários fatores influem na porção efetiva da precipitação 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 efetiva (SAMPAIO et al., 2000; RAHMAN et al., 2008).

1.4 Fatores que interferem na chuva efetiva

3.2.1 Características da chuva

Dentre os fatores ligados às características da chuva, destacam-se a intensidade, duração e a frequência, pois quanto maior a intensidade, mais rápido o

solo atinge a sua capacidade de infiltração provocando um excesso de chuva que escoará superficialmente. Porém, caracterizar os eventos naturais de chuva é uma tarefa extremamente complexa, em função de ser um fenômeno com enorme variabilidade temporal e espacial (MEHL et al., 2001). Assim, para possibilitar estudos em períodos mais curtos e com maior controle das intensidades da chuva pode-se utilizar chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001; ELTZ et al., 2001).

Trabalhando com diferentes intensidades de chuva simulada (0,5, 0,75 , 1, 1,5, e 2 mm min⁻¹) Huang et al. (2013) observaram que, houve uma relação linear positiva entre a intensidade média do escoamento e a intensidade da chuva e, que a intensidade do escoamento aumentou com o aumento da duração de precipitação em relação logarítmica.

Avaliando as perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas, Oliveira et al. (2013) observaram para uma mesma declividade do terreno (2,5%) um aumento nos valores de taxa de escoamento superficial constante de 5,87 a 80,41 mm h⁻¹ e uma redução no tempo do início do escoamento para intensidades de chuvas de 30 e 120 mm h⁻¹, respectivamente.

Em trabalho realizado com diferentes intensidades de chuvas simuladas em área de integração agricultura-pecuária, Panachuki et al. (2006) relatam que as perdas de solo e de água aumentam com a aplicação de intensidades de chuvas mais elevadas. Semelhantemente, Carlesso et al. (2011) e Spohr et al. (2009) afirmam que, um aumento na intensidade da chuva causa redução no tempo de início do escoamento e, conseqüentemente, maior é a taxa constante de escoamento, o que está associado ao fato de haver uma relação inversa entre o tempo de início do escoamento e a taxa constante de escoamento superficial, independentemente das condições da superfície do solo e da chuva.

A duração da chuva também é diretamente proporcional ao escoamento, pois para chuvas de intensidade constante, haverá maior oportunidade de escoamento quanto maior for a duração. Outro fator importante é o da chuva antecedente, pois uma precipitação que ocorre quando o solo está úmido devido a uma chuva anterior ou mesmo irrigação, terá maior probabilidade de gerar escoamento. Em solos mais úmidos, a capacidade de infiltração tende a ser menor e a desagregação do solo

pelo impacto das gotas da chuva é favorecida, causando o selamento superficial e intensificando o escoamento superficial (OLIVEIRA et al., 2010).

Procurando identificar as características e os padrões de chuvas ocorrentes em Santa Maria, RS, Mehl et al. (2001) analisaram pluviogramas compreendendo o período de 1963 a 1989 e 1991 a 1992, onde identificaram que a intensidade média dos picos de chuvas foi de $35,9 \text{ mm h}^{-1}$ e, que apenas 6,6% do total de chuvas possuem picos com intensidade superior a 100 mm h^{-1} , as quais possuem duração média de 8 horas, e a duração dos picos foi de 6 minutos e 50 segundos.

3.2.2 Cobertura da superfície do solo

A cobertura vegetal da superfície do solo sofre várias modificações quer sejam naturais ou artificiais, e estas modificações produzem os mais variados impactos no meio ambiente (SANTOS et al., 2000). O escoamento superficial é um dos fatores alterados quando a cobertura vegetal do solo é modificada (CASSOL et al., 2004; BERTOL et al., 2008; DELAUNE; SIJ, 2012; HUANG et al., 2013).

De maneira isolada, a presença da cobertura do solo por resíduos vegetais é o fator mais importante na dissipação da energia de impacto das gotas da chuva na superfície do solo, visto que ela pode evitar a desagregação de suas partículas (BERTOL et al., 2007; PANACHUKI et al., 2011). Além disso, resíduos vegetais em contato direto com a superfície do solo são eficazes na redução da carga de sedimentos, no escoamento superficial ou enxurrada (BERTOL et al., 2007).

Desse modo, sistemas de manejo conservacionistas do solo, que promovam pequena ou nenhuma movimentação mecânica do solo, que mantenham a maior parte dos resíduos culturais sobre a superfície e promovam a elevação da rugosidade da superfície do solo são mais eficazes no controle das perdas de solo e água. Solos sob plantio direto apresentam um aumento da taxa de infiltração de água, quando comparado ao preparo convencional, o que decorre, principalmente, do fato de haver uma rede de macroporos contínuos em profundidade no sistema plantio direto (SILVA, 2003; BARCELOS et al., 1999). Avaliando o impacto do cultivo em sistema de plantio direto a longo prazo sobre a quantidade e qualidade do

escoamento, Delaune; Sij (2012) concluíram que a conversão de plantio direto a preparo convencional aumenta o volume de escoamento em 38%.

A cobertura do solo proporcionada pelos resíduos culturais deixados na superfície tem ação direta e efetiva na redução da erosão hídrica, em virtude da dissipação de energia cinética das gotas da chuva, a qual diminui a desagregação das partículas de solo e o selamento superficial, reduzindo o escoamento superficial (PRUSKI, 1997; SANTOS et al., 2000; COGO et al., 2003). Os resíduos vegetais atuam ainda na redução da velocidade do escoamento superficial, devido ao aumento da rugosidade hidráulica do percurso da água, o que reduz a capacidade erosiva da enxurrada (PRUSKI, 1997), podendo reduzir drasticamente a perda de solo e, assim, afetando diretamente a taxa de escoamento superficial (SANTOS et al., 2000).

A percentagem de cobertura do solo proporcionada pelas restevras das culturas é fator fundamental na redução das perdas de solo e água, obtendo-se boa eficácia já com 30% de cobertura (LOPES et al., 1987; COGO et al., 2003), mas, quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo, maior será a resistência do solo a ocorrência de erosão e, menor será o escoamento superficial, conseqüentemente, maior a infiltração de água no solo. No entanto, a persistência dessa proteção ao solo irá depender do grau de incorporação dos resíduos culturais, bem como do método de preparo e/ou de semeadura empregado (COGO et al., 2003).

Após conduzirem estudos sobre a avaliação do escoamento superficial em solo franco-argilo-arenoso, Cassol et al. (2004) afirmam que a utilização de 100% de cobertura da superfície do solo por resíduos vegetais resulta na elevação da rugosidade hidráulica, redução da velocidade média do escoamento, provocada pelo aumento das forças viscosas promovida pela interposição física dos resíduos ao escoamento, além de reduzir drasticamente as taxas de desagregação e perda de solo.

Em estudo conduzido por Oliveira et al. (2013), avaliando o tempo de início do escoamento superficial em solo com diferentes níveis de cobertura por palha verificou-se que o tempo de início do escoamento superficial foi atrasado em 31 e 35 minutos com a utilização de 2,5 e 5 Mg ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo, respectivamente, em relação ao solo descoberto.

Em trabalho avaliando o efeito da cobertura da superfície do solo nas perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo a partir de chuvas simuladas, Silva et al. (2005) verificaram que, elevando-se a porcentagem de cobertura de 0 para 80%, causou redução de 99,5%; 85,5%; 76,5% e 87,1% nas perdas de solo e de 68,8%; 78,7%; 61,5% e 83,6% nas perdas de água para as intensidades de 60; 80; 100 e 120 mm h⁻¹, respectivamente. Os mesmos autores afirmaram ainda que a utilização de apenas 20% de cobertura da superfície do solo resulta em redução de 48,8%; 35,5%; 51,1% e 81,3% nas perdas de solo e de 11,4%; 38,6%; 15,7% e 56,5% nas perdas de água em relação à parcela sem cobertura, demonstrando que a cobertura do solo reduz de forma mais eficiente as perdas de solo quando comparada à redução nas perdas de água.

Neste mesmo sentido, Albuquerque et al. (2002), encontraram redução de aproximadamente 99% das perdas de solo e 74% das perdas de água nas parcelas com cobertura morta em relação às parcelas com solo descoberto. Enquanto que, Castro et al. (2006), encontraram 80% de perda de água nas parcelas sem cobertura vegetal em relação às com cobertura.

Em relação à cobertura do solo por vegetação, Sriwongsitanon; Taesombat (2011), estudando como as mudanças na cobertura do solo por floresta influenciam no comportamento da inundação na Bacia do Rio Ping Alto, no norte da Tailândia, verificaram que, durante inundações maiores o coeficiente de escoamento é maior para alta cobertura florestal, mas para inundações menores, o coeficiente de escoamento é menor quando a cobertura florestal é alta. Huang et al. (2013), avaliando o escoamento superficial solo com diferentes coberturas vegetais (*Medicago sativa* L., *Triticum aestivum* L., *Lolium perenne* L.) observaram uma relação exponencial negativa entre a intensidade do escoamento médio e a cobertura vegetal.

Em trabalho avaliando as perdas de solo e água durante o desenvolvimento da cultura da soja a partir de chuvas simuladas, Engel et al. (2007) afirmam que, as perdas de solo são bem explicadas pelos resíduos culturais deixados pelo cultivo anterior, pela cobertura do dossel da planta e o tipo de preparo do solo, enquanto as diferenças no tempo de início de escoamento, a taxa de escoamento e perda de água entre os tratamentos foram menos relacionadas a esses fatores.

Estudando o escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo, Bertol et al., (2008) observaram que, independente da cultura empregada (milho, feijão ou

soja) a taxa constante de enxurrada, o coeficiente de escoamento e o volume de escoamento são menores nos tratamentos de semeadura direta.

De acordo com Engel et al. (2007), o efeito da palha na redução do escoamento durante o crescimento da cultura é maior que o efeito da cobertura do solo pelo dossel das plantas. Ainda, de acordo com estes autores, a cobertura do solo pelo dossel das plantas geralmente tem maior efeito na redução da erosão hídrica e do escoamento superficial no preparo convencional, ou seja, com o solo descoberto, do que sob plantio direto.

3.2.3 Declividade da superfície do solo

A presença de depressões acumuladoras na superfície do solo, a declividade da superfície, bem como o traçado dos cursos d'água são responsáveis pela retenção e drenagem do escoamento superficial. Áreas com topografia íngreme produzem escoamento superficial mais rápido e mais volumoso, por ser menor a chance de infiltração. No entanto, a presença de depressões acumuladoras de água retardam o escoamento superficial, que passa a ocorrer somente após terem sido excedidas estas capacidades retentoras.

A inclinação da superfície do terreno influencia fortemente as perdas de água e solo, pois, à medida que ela aumenta, aumentam o volume e a velocidade da enxurrada e diminui 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 o solo, por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido da pendente do terreno (COGO et al., 2003). Por este motivo, Huang et al. (2006), sugerem para uma melhor estimativa do escoamento superficial a incorporação do fator de declividade no método CN.

Para Oliveira et al. (2010), quanto mais acentuada a declividade do terreno maior será o volume de escoamento superficial e, conseqüentemente, maiores os danos devido a erosão hídrica. Da mesma forma, Carlesso et al. (2011) afirmam que, a inclinação do terreno é um fator que influencia fortemente as perdas de solo e

água, pois quando ela aumenta, maior será o volume de escoamento e a velocidade do fluxo de água, resultando em menor infiltração de água.

Segundo Cogo et al. (2003), nas declividades mais elevadas, as diferenças nas perdas de solo entre os preparos aumentam consideravelmente, porém de forma diferenciada, sendo o efeito mais pronunciado no preparo convencional, intermediário no preparo reduzido e menor na semeadura direta. O aumento da erosão com o aumento da declividade do terreno se deve ao aumento da capacidade erosiva da enxurrada nos declives mais acentuados, decorrente do aumento de sua velocidade, especialmente quando o solo é intensamente mobilizado e apresenta baixa cobertura superficial, ficando sujeito à formação de sulcos, selamento superficial e/ou crostas, os quais dificultam a infiltração de água no solo e favorecem o escoamento superficial.

Estudando as perdas de água por escoamento superficial em diferentes declividades do terreno, quantidade de palha na superfície e intensidades de chuvas simuladas, Oliveira et al. (2013) observaram, para uma intensidade de chuva de 30 mm h^{-1} , ausência de escoamento superficial na declividade zero, enquanto que, nas declividades de 2,5, 5 e 8%, as perdas de água por escoamento superficial representaram 1, 9 e 11% da quantidade de chuva aplicada, respectivamente.

Avaliando as perdas de solo e água influenciadas por classes de declive do solo em três ciclos de cultivo, Cogo et al. (2003) encontraram incremento no escoamento superficial da declividade de 0,035 para $0,095 \text{ m m}^{-1}$ de 39,8% sob sistema convencional de preparo do solo e de 19% sob sistema de semeadura direta, indicando a necessidade de adotar-se práticas conservacionistas de suporte, como a utilização de terraços, especialmente quando as lavouras são estabelecidas em declives longos e/ou inclinados, para garantir o adequado controle da erosão e, ao mesmo tempo, disciplinar o movimento das águas de escoamento superficial ou enxurrada.

Procurando identificar a influência de diferentes declividades da superfície (2, 6, 10, 14 e 18%) nas perdas de solo, Amorin et al. (2001) realizaram um experimento a partir de chuvas simuladas, e observaram que a perda acumulada de solo ao longo do tempo apresentou comportamento com tendência linear proporcionando, desta forma, taxas de perda de solo constantes ao longo dos testes e que a perda total de solo aumentou à medida que os valores de declividade da

superfície do solo e de intensidade da chuva foram aumentados, mas o efeito da declividade na perda de solo foi menos expressivo que o da intensidade da chuva.

1.5 Escoamento superficial

O escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento da água sobre a superfície do solo. Quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração de água do solo, inicia o acúmulo superficial de água e, ultrapassada a capacidade de acúmulo de água na superfície do terreno, inicia o escoamento superficial (PRUSKI et al., 2006).

Os fatores que influenciam a infiltração de água no solo interferem também no escoamento superficial resultante. De modo geral, sob uma intensidade constante de chuva, a infiltração e o escoamento superficial são processos antagônicos: à medida que um diminui (infiltração) o outro aumenta (escoamento), até atingirem certo equilíbrio dinâmico (estabilização) (SPOHR et al., 2009). Nessas condições, quando a taxa de escoamento superficial praticamente não varia com o tempo passa a ser chamada de taxa constante de escoamento superficial (CARLESSO et al., 2011).

Para fins de obtenção da chuva efetiva, conceituada como a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas, como escoamento superficial, percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008), a obtenção do escoamento superficial é crucial, visto que esta é a variável que mais influencia na quantidade de água que ficará disponível as culturas. Como a medida do escoamento superficial em nível de campo é onerosa e demorada, o método CN é utilizado mundialmente para estimar o escoamento superficial (JACOBS; SRINIVASAN, 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al., 2013).

1.6 Estimativa do escoamento superficial pelo Método Curva Número

O método CN foi desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA), atualmente Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS), sendo considerado um método simples e largamente utilizado no mundo para a estimativa do escoamento superficial (SOUZA et al., 1995; MISHRA et al., 2006; PRUSKI et al., 2008; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011 ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al. 2013).

Este método baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI et al., 2008; MISHRA; SINGH, 2003).

Os valores do CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura (NRCS, 2009, LIMA et al., 2007). Porém, a metodologia da CN necessita de ajustes para alguns usos da terra e grupos de solo, como em solos com elevadas quantidades de palha sobre a superfície e com utilização do sistema de plantio direto, situações comuns na região Sul do Brasil (CARLESSO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012). No que se trata da cobertura vegetal sobre o solo, sabe-se que este fator sofre várias modificações tanto naturais como antrópicas e essa dinâmica produz alterações nas respostas hidrológicas (GARCIA-RUIZ et al., 2008).

No Brasil, alguns trabalhos tem buscado avaliar e/ou determinar o valor CN para alguns sistemas de manejo ou bacias hidrográficas, como Souza et al. (1995), Mello et al. (2003), Beskow et al. (2009), Carlesso et al. (2011), Araújo Neto et al. (2012). Em outros países também estão sendo desenvolvidos trabalhos propondo ajustes no método em função das diferentes condições da superfície do solo, tanto em relação ao tipo de vegetação e cobertura do solo quanto à declividade do terreno, como é o caso do estudo realizado por Jacobs; Srinivasan (2005) nos

Estados Unidos, do realizado por Huang et al. (2006) na China, por Ebrahimian et al. (2012) no Irã e por Deshmukh et al. (2013) na Índia, entre outros.

Desta forma, cresce a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar o número da CN mediante diferentes cenários de uso e ocupação do solo para diferentes regiões (ARAÚJO NETO et al., 2012).

1.7 Análise de equações multivariadas para a modelagem do escoamento superficial

Uma das opções para a análise de regressão linear múltipla é a ferramenta stepwise do pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System). De acordo com Diniz (2008), o modelo stepwise é um procedimento de seleção da melhor equação de regressão por inclusão e/ou substituição de sucessivas variáveis preditoras. A ordem de inserção é determinada pela medida de importância das variáveis ainda não incluídas na equação, sendo este nível de importância avaliado pelo coeficiente de correlação parcial.

As equações multivariadas permitem estimar variáveis de difícil obtenção por meio de outras que podem ser mais facilmente obtidas (PACHEPSKY et al., 2006; NASTA et al., 2009) e são bastante utilizadas para a estimativa de propriedades hidráulicas do solo (TOMASELLA et al., 2000; SANTRA; SANKAR, 2008; MICHELON et al., 2010).

Na literatura são poucos os estudos englobando o uso de equações multivariadas para a estimativa do escoamento, Carlesso et al. (2011) utilizaram equações multivariadas para estimar variáveis do modelo de Smith modificado. Os autores observaram que a estimativa da taxa constante de escoamento superficial, através das equações contendo as variáveis intensidade da chuva, declividade do terreno e porosidade total do solo foi satisfatória para os solos estudados.

Em estudo similar para solos do Uruguai, Spohr et al. (2009) obtiveram resultados satisfatórios para a estimativa da taxa constante de escoamento superficial, realizada por meio das equações multivariadas, contendo as variáveis intensidade da chuva e fração de argila e areia. Dalla Santa (2010), utilizando análise de regressão linear múltiplas para modelar a taxa constante de escoamento

superficial e o tempo de início do escoamento, observou que as variáveis preditivas são as relacionadas à chuva (intensidade, duração e volume) e a umidade do solo antecedente às chuvas.

1.8 Modelo SIMDualKc para a estimativa da chuva efetiva

O modelo SIMDualKc, descrito por Godinho et al. (2007) e Rosa et al. (2012), foi desenvolvido para o cálculo da ET_c e para a programação da irrigação, utilizando a metodologia dos coeficientes de cultivo duais (K_{cb} + K_e) proposta por Allen et al. (1998, 2005). Estes autores calibraram e validaram o modelo SIMDualKc com dados de diversos ensaios de campo, observando uma boa concordância com os dados observados no campo.

Para estimar o escoamento superficial o modelo SIMDualKc utiliza o método CN (ROSA et al., 2012). Este método usa dois parâmetros, CN e a depleção de água na camada superficial (D_e). O primeiro é selecionado a partir de valores tabelados (por ex. Allen et al., 2007), dependendo do tipo de solo e vegetação, sendo depois ajustado para as condições do teor de umidade na camada superficial do solo (D_e) antecedente a precipitação. D_e é calculado por um balanço hídrico diário na camada superficial do solo. Assim, de acordo com a correspondência entre D_e e três condições pré-estabelecidas de umidade do solo, AWC I, AWC II, e AWC III (representando, respectivamente, condições secas, médias, e úmidas), o valor de CN é ajustado diferenciadamente (Rosa et al., 2012).

O balanço hídrico do solo na zona radicular é expresso em termos de depleção de água no solo, conforme descrito por Allen et al. (1998, 2007):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i$$

onde D_{r,i} é a depleção de água na zona radicular no fim do dia i (mm), D_{r,i-1} é a depleção de água na zona radicular no fim do dia i-1 (mm), P_i é a precipitação no dia i (mm), RO_i é o escoamento superficial no dia i (mm), I_i é a lâmina de irrigação infiltrada no solo no dia i (mm), CR_i é a ascensão capilar de água (mm), ET_{c,i} é a

evapotranspiração da cultura no dia i (mm), e DP_i é a perda de água por percolação profunda no dia i (mm).

A ascensão capilar (CR_i) e a percolação profunda (DP_i) podem ser estimadas pelo modelo utilizando duas formas alternativas:

i) Usando o procedimento descrito em Doorenbos e Pruitt (1975), no qual é assumido que DP ocorre na sua totalidade no próprio dia em que o excesso de água é aplicado e que CR depende de valores potenciais de ascensão capilar pré-determinados G_{max} ($mm\ d^{-1}$) e da água disponível no solo (ASW).

ii) Usando as equações paramétricas propostas por Liu et al. (1998). Neste caso os utilizadores têm que introduzir os valores dos parâmetros referentes ao solo, do índice de área foliar (LAI) e das profundidades freáticas (WT_{depth}).

Os mulches são usados para reduzir as perdas de água por evaporação a partir da superfície do solo, moderar as flutuações de temperatura na camada superior do solo para acelerar o desenvolvimento da cultura nas fases iniciais, para controlar a erosão e aumentar a infiltração, ou para auxiliar no controlo de plantas infestantes. Os mulches podem ser constituídos por resíduos orgânicos de plantas, filmes de plástico. Os mulches influenciam a evaporação do solo na medida em que reduzem a quantidade de energia disponível na superfície do solo e os fluxos ascendentes de água para esta. Estes impactos podem ser considerados através das mudanças na fração f_c da superfície do solo sombreada ou não exposta à radiação solar, que é o parâmetro mais relevante para a determinação do coeficiente de evaporação do solo K_e .

No caso dos mulches orgânicos, a densidade do mulch e a sua espessura, assim como a fração da superfície do solo coberta pelo mulch, determina o montante da redução na evaporação. No modelo SIMDualKc é o utilizador que define a percentagem de redução da evaporação a partir do solo e , portanto, dos valores de K_e , dando o modelo apenas valores indicativos desta redução, tal como apresentado em Allen et al. (2007), que sugerem uma redução de 5% por cada 10% de solo coberto por mulch. Esta percentagem de redução, combinada com a fração do solo coberta pelo mulch, origina o total de redução da evaporação.

O percentual de redução da evaporação do solo, combinada com a fração de solo coberto pela mulch, determina a redução total estimada em evaporação do solo. Os dados de entrada do modelo incluem a densidade de cobertura morta e da fração de solo coberto pela palha, que são usado para ajustar as frações f_{ewi} e f_{ewp} . O

modelo ainda determina a evaporação a partir de mulches plásticos e mulch ativos como cobertura verde em pomares.

Dessa maneira, o modelo simula o balanço hídrico do solo na zona radicular em nível de campo, utilizando um intervalo de tempo diário. A lâmina de irrigação recomendada depende das instruções dadas pelo utilizador em termos das características do sistema de irrigação, do modo como se quer conduzir a irrigação e das restrições impostas à disponibilidade de água para a cultura (ROSA et al., 2012).

ARTIGO 1: DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DURANTE O CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO

RESUMO: A determinação do escoamento superficial é importante na definição da chuva efetiva para fins de manejo da irrigação. Uma precisa estimativa da chuva efetiva contribui para maximizar o uso da água das chuvas naturais minimizando a utilização da irrigação suplementar. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar o escoamento superficial durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, cultivado em solo com e sem palha na superfície, em diferentes declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas e, comparar os valores observados aos estimados pelo método Curva Número (CN). Realizou-se um experimento à campo, em área experimental do Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria, RS, no ano agrícola 2010/11, aplicando-se diferentes intensidades de chuvas simuladas (35, 70 e 105 mm h⁻¹), em distintos momentos do ciclo da cultura do feijão (0, 28, 63 e 100% de cobertura do solo) e diferentes declividades do terreno (1, 5 e 10%), em solo com e sem palha de aveia preta na superfície. Determinaram-se o tempo de início do escoamento (T_i), a taxa constante de escoamento ($T_{x.c}$), o escoamento total (E_t) e a porcentagem de escoamento (% E). Comparou-se os valores observados com os estimados pelo método CN e sugeriu-se ajustes nos valores de CN, a partir do coeficiente Nash e Sutcliffe para melhorar as estimativas do escoamento superficial. Os resultados indicaram que a cobertura da superfície do solo por palha foi mais efetiva nas reduções das perdas de água por escoamento superficial que a cobertura do solo pelo dossel do feijoeiro. As reduções no E_t proporcionadas pela presença de palha na superfície do solo foram de até 45%. O método CN subestimou o escoamento superficial em até 22 mm para o solo sem palha e superestimou em até 25 mm para o solo com palha na superfície. Enquanto que, o método CN ajustado para as condições de palha e intensidades de chuvas superestimou o escoamento superficial em até 10 mm para o solo sem palha e em até 11 mm para o solo com palha na superfície. A melhoria na qualidade da estimativa do escoamento superficial após o ajuste método CN pode ser comprovada pelo acréscimo superior a 100% no coeficiente de Nash e Sutcliffe verificado após o ajuste.

Palavras-chave: palha, dossel vegetal, declividade do terreno, *Phaseolus vulgaris*.

DETERMINATION AND ESTIMATE OF RUNOFF DURING THE DEVELOPMENT OF BLACK BEAN CYCLE

ABSTRACT: The determination of runoff is essential in defining the effective rainfall for irrigation management purposes. An accurate estimate of effective rainfall contributes to maximize the use of water from natural rainfall minimizing the use of supplemental irrigation. The objective of this study was to characterize the runoff during the development of black bean cycle in soil with and without straw on the surface in different terrain slope and intensity of rainfall simulator, and compare the observed values with the estimated by Curve Number method (CN). We conducted an experiment to field, in area of the Federal University of Santa Maria, RS, during the agricultural year 2010/11, where different intensities of simulated rainfall (35, 70 and 105 mm h⁻¹) were applied in different moments from the bean crop (0, 28, 63 and 100% soil cover) cycle and different soil slope (1, 5 and 10%) in soil with and without oat straw on the surface. Were quantified start time to runoff (T_i), the constant runoff rate ($T_{x.c}$), the total runoff (E_t) and the percentage of runoff (% E). We compared the observed values with the estimated by CN method and it was suggested adjustments in the CN values, from Nash and Sutcliffe coefficient to improve estimates of runoff. The results indicated that the coverage of the soil surface with straw was more effective in reducing the loss of water by runoff than the soil cover by bean canopy. Reductions in E_t provided by the straw on the soil surface was up to 45%. The CN method underestimated the runoff by up to 22 mm in the soil without straw and overestimated by up to 25 mm in the soil with straw on the surface. Whereas, the CN method adjusted to the conditions of straw and intensities of rainfall runoff overestimated by up to 10 mm in the soil without straw and up to 11 mm in the soil with straw on the surface. The improvement in the quality of the surface runoff after adjusting the CN method can be proven by a 100% greater increase in the coefficient of Nash and Sutcliffe found after adjustment.

Keywords: straw, plant canopy, terrain slope, *Phaseolus vulgaris*.

INTRODUÇÃO

Mensurar o quanto de uma chuva natural irá contribuir para o armazenamento de água no solo é de suma importância para o manejo da irrigação, possibilitando a maximização do uso da água das chuvas naturais, minimizando a utilização de irrigação suplementar e, com isso, reduzindo os custos da irrigação e contribuindo para a conservação da água.

Para fins de obtenção da chuva efetiva, conceituada como a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas, como escoamento superficial, percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008), a obtenção das taxas de escoamento superficial é crucial, visto que esta é a variável que mais influência tem na quantidade de água que ficará disponível às culturas.

Vários são os fatores que afetam o escoamento superficial, dentre os quais pode-se destacar a chuva (intensidade, duração e a frequência), a cobertura do solo, seja por palha ou pelo dossel das culturas, a declividade do terreno, características físico-hídricas do solo, entre outros (PANACHUKI et al., 2006; BERTOL et al., 2007; ENGEL et al., 2007; BERTOL et al., 2008; PRUSKI et al., 2008; SPOHR et al., 2009; BANASIK, K.; WOODWARD, D., 2010; CAO et al., 2011; CARLESSO et al., 2011; MUÑOZ-ROBLES et al., 2011; PANACHUKI et al., 2011, OLIVEIRA et al., 2013).

Em relação aos fatores que afetam o escoamento superficial, a presença de palha na superfície do solo causa redução na velocidade do escoamento superficial e elevação da altura da lâmina do escoamento (CASSOL et al., 2004), resultando em menores perdas de solo e água (PANACHUKI et al., 2011). Em contrapartida, as perdas de solo e de água aumentam com intensidades de chuva mais elevadas (PANACHUKI et al., 2006) que causam redução no tempo de início do escoamento, independente das condições da superfície do solo (CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013). Neste mesmo sentido, quanto mais acentuada a declividade do terreno maior será o volume de escoamento superficial e, conseqüentemente, maiores os danos devido à erosão hídrica (OLIVEIRA et al., 2010). Para a realização destes estudos pode-se utilizar chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001; ELTZ et al., 2001), como é o caso dos trabalhos desenvolvidos recentemente por Huang et al. (2013) e Oliveira et al. (2013).

Como a medida do escoamento superficial em nível de campo é onerosa e demorada, o método CN é utilizado mundialmente para estimar o escoamento superficial (JACOBS; SRINIVASAN, 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al., 2013). O Método CN foi desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Este Método baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento de chuva é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representam as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI et al., 2008; MISHRA; SINGH, 2003).

Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura (NRCS, 2009, LIMA et al., 2007). Porém, essa metodologia não está bem ajustada para alguns usos da terra e grupos de solo, como em solos com elevadas quantidades de palha sobre a superfície e com utilização do sistema de plantio direto, situações comuns na região Sul do Brasil (CARLESSO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012), assim como, para diferentes situações de cobertura vegetal (SRIWONGSITANON; TAESOMBAT, 2011; HUANG et al., 2013). Estudos com culturas anuais para fins de manejo de irrigação são inexistentes e, tal abordagem é levantada no presente trabalho para a cultura do feijão, tendo em vista a importância desta em áreas sob plantio direto e irrigação por aspersão no estado do Rio Grande do Sul.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o escoamento superficial durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, cultivado em solo com e sem palha na superfície, em diferentes declividade do terreno e intensidades de chuvas simuladas e, comparar os valores observados aos estimados pelo método CN.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria-RS, situada em Latitude 29°41'24"S, Longitude 53°48'42"W e altitude de 105 metros. O clima da região é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

O experimento foi instalado a campo no ano agrícola 2010/11, em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. Os tratamentos consistiram de quatro momentos de aplicação de chuvas simuladas durante o ciclo da cultura do feijão, definidos como momentos 1, 2, 3 e 4, os quais correspondem à aplicação da chuva simulada a 1, 16, 29 e 43 dias após a semeadura, quando o dossel das plantas de feijão cobria 0, 28, 63 e 100% da superfície do solo, respectivamente.

A cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas de feijão foi determinada através do método das interseções ou do ponto quadrado, com auxílio de um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m com linhas fixadas a cada 0,05 m em todos os lados, formando uma grade de 100 pontos nos locais de intersecção das linhas. As avaliações foram realizadas com o auxílio de fotografias digitais, obtidas a aproximadamente 1,7 m da superfície do solo com câmera fotográfica. Nas fotografias foram contabilizadas as intersecções que se sobrepunham ao dossel do feijoeiro.

O experimento foi conduzido com duas quantidades de palha na superfície do solo (0 e 5 Mg MS ha⁻¹ de palha de aveia preta), três declividades do terreno (1, 5 e 10 %) e três intensidades de chuva simulada (35, 70 e 105 mm h⁻¹).

A palha utilizada foi oriunda de plantas de aveia preta, que foram previamente dessecadas, cortadas próximo ao solo e secas ao Sol. Posteriormente, após a retirada cuidadosa da vegetação espontânea das parcelas experimentais, esta palha foi distribuída de acordo com o teor de massa seca desejado.

As declividades do terreno (1, 5 e 10%) foram delimitadas de acordo com a topografia natural da área, determinadas com auxílio de um nível de mangueira, sendo que, em cada declividade foram demarcados três locais distintos para

aplicação das diferentes intensidades de chuvas simuladas. Em cada local, foram instaladas seis parcelas de 1,0 x 1,0 metros, delimitadas com chapas metálicas cravadas no solo e contendo na parte inferior uma calha, para a coleta da água de escoamento superficial, conforme ilustrado na figura 4.1.

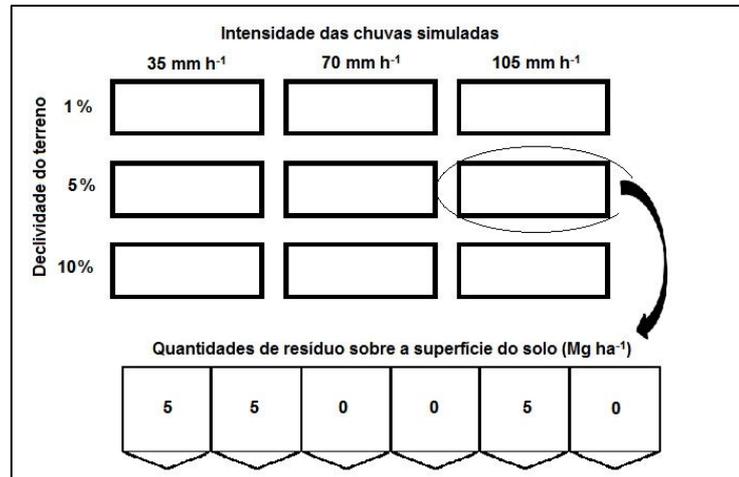


Figura 4.1. Ilustração sobre a organização do experimento para avaliação do escoamento superficial do solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão. Santa Maria, RS, 2014.

As chuvas simuladas foram aplicadas por um simulador estacionário com seis aspersores oscilantes desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA-ARS, EUA (NORTON; BROWN, 1992), instalado a 2,45 metros acima da superfície do solo, com pressão de saída da água nos aspersores mantida em 41,4 KPa (6,0 psi ou 4,22 mca). A intensidade da chuva foi aferida em cada avaliação através de pluviômetros instalados ao lado das parcelas experimentais e todas as chuvas simuladas tiveram duração de 120 minutos (2 horas). As chuvas simuladas foram aplicadas em condições de umidade do solo semelhantes, não havendo diferenças entre os tratamentos, sendo a umidade inicial na camada de 0 - 0,1 m de 0,15 g g⁻¹ e a umidade final, após a aplicação das chuvas, de 0,32 g g⁻¹.

Durante a realização das chuvas simuladas determinaram-se o tempo de início do escoamento superficial (T_i , minutos), a taxa constante de escoamento (Tx_c , mm h⁻¹), o escoamento total (E_t , mm) e a porcentagem de escoamento (% E). O T_i foi considerado quando a superfície do solo da parcela apresentava-se encharcada e um filete contínuo de água começava a escoar na calha coletora. Uma vez iniciado o escoamento, realizou-se a coleta dos volumes de água escoados em intervalos de cinco minutos durante 120 minutos para cada intensidade de chuva simulada. A Tx_c

foi considerada quando o escoamento praticamente não variava no tempo. O E_t foi determinado pelo somatório dos volumes escoados até os 120 minutos da chuva e, a % E foi calculada pela razão entre o volume total da chuva e o escoamento total multiplicado por 100.

Após todas as avaliações, em uma área próxima ao experimento, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e deformada para caracterização físico-hídrica, nas camadas de 0 a 0,05; 0,05 a 0,15; 0,15 a 0,25 e, 0,25 a 0,55 m de profundidade do solo, sendo todas as análises realizadas no Laboratório de Análises Físicas de Solo do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria, cujos resultados estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros da caracterização físico-hídrica do solo da área experimental. Santa Maria, RS, 2014.

Camada do solo (m)	Textura			Ds (g cm ⁻³)	PT (cm ³ cm ⁻³)	Microp. (cm ³ cm ⁻³)	Macrop. (cm ³ cm ⁻³)
	% Arg.	% Ar.	% Sil.				
0 - 0,05	16,72	44,44	38,84	1,35	0,46	0,34	0,12
0,05 - 0,15	16,91	40,66	42,43	1,38	0,45	0,34	0,11
0,15 - 0,25	17,25	41,23	41,52	1,34	0,46	0,35	0,12
0,25 - 0,55	20,73	35,35	43,92	1,35	0,46	0,35	0,11

Onde: Arg.: Argila; Ar.: Areia; Sil.: Silte; Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade total do solo; Microp.: Microporosidade do solo; Macrop.: Macroporosidade do solo.

O solo pertence à classe textural franco e apresenta densidade em todas as camadas avaliadas menor que a considerada crítica para solos nesta faixa de argila, que é de 1,6 g cm⁻³, bem como, apresenta valores de macroporosidade acima de 0,1 cm³ cm⁻³, valor crítico ao desenvolvimento das raízes da maioria das culturas (MICHELON et al., 2007).

A semeadura da cultura do feijão foi realizada em 18 de janeiro de 2011, em sentido transversal à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se a cultivar IPR Tiziu (grupo preto, hábito de crescimento indeterminado), com espaçamento entre linhas de 0,45 m e população de 8,5 plantas por metro linear (190.000 plantas ha⁻¹). Os tratamentos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações da Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão (CEPEF, 2007).

Para a estimativa do escoamento superficial pelo método CN seguiu-se a metodologia descrita em NRCS (2009); SOUZA et al. (1995); MISHRA et al. (2006) e PRUSKI et al. (2008). Considerou-se o solo como pertencente ao grupo hidrológico C e uso do solo com cultivo em fileiras com curvas de nível. Sobre a condição hidrológica, quando da utilização de palha sobre a superfície do solo, esta foi considerada boa, enquanto que, quando da ausência de palha esta foi considerada má. Em ambos os casos, o valor de CN foi corrigido para uma condição de umidade antecedente AMC I, pois nos cinco dias antecedentes a aplicação das chuvas simuladas o somatório das chuvas e irrigações foi menor que 35 mm (SOUZA et al., 1995; MISHRA et al., 2006; PRUSKI et al., 2008).

Conforme estas condições, o valor de CN adotado foi de 65,8 para o solo com palha na superfície e, de 68,6 para o solo sem cobertura de palha. Cabe salientar, que o método CN não permite estimar individualmente o escoamento para cada um dos quatro níveis de cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas de feijão, por não considerar este nível de detalhamento da superfície do solo.

No sentido de propor um melhor ajuste entre o escoamento superficial estimado pelo método CN e o observado a campo, identificou-se o valor ideal da Curva Número, de forma que o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) atingisse valor máximo para aquele grupo de dados (MACHADO et al., 2003; ARAÚJO NETO et al., 2012).

O coeficiente de Nash e Sutcliffe é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos, sendo que este coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito (MACHADO et al., 2003). O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE ficar entre 0,36 e 0,75. O NSE, além de traduzir a similaridade da variabilidade entre duas variáveis, é um indicador da similaridade de quantificação, o que é considerado bastante relevante na avaliação de confiança e eficiência na modelagem (ARAÚJO NETO et al., 2012).

O coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) é determinado pela seguinte equação:

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum (Y_m - Y_c)^2}{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right) \quad (\text{Equação 4.1})$$

Em que:

NSE – coeficiente de Nash e Sutcliffe, $\{-\infty < \text{NSE} < 1\}$;

Y_m – valor medido;

Y_c – valor calculado;

\bar{Y}_m - média dos valores medidos.

As variáveis (T_i , $T_{x.c}$, E_t e % E) foram submetidas a análise da variância e as médias foram comparados entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando o pacote estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as diferentes variáveis analisadas (T_i , $T_{x.c}$, E_t e % E) são apresentados na tabela 4.2 para o solo com palha na superfície e na tabela 4.3 para solo sem palha na superfície.

O T_i em ambas as situações de cobertura da superfície do solo por palha, foi retardado com o avanço do desenvolvimento das plantas de feijão do momento 3 para o momento 4. Para uma intensidade de chuva de 35 mm h^{-1} e declividade do terreno de 1%, o acréscimo foi de 8 e de 4 minutos para o tempo de início do escoamento, em solo com e sem palha, respectivamente. Todavia, essa resposta não foi observada durante a evolução do dossel do momento 1 para o momento 2, possivelmente em função do selamento dos poros superficiais do solo ocorrido durante a primeira chuva (momento 1).

O selamento superficial ocorre em função do efeito integrado da energia cinética do impacto das gotas d'água e da força cisalhante do escoamento superficial, os quais atuam na desagregação, desprendimento e arraste das partículas do solo (CARVALHO et al., 2002) e, com a infiltração da água, acomodam-se no poros, obstruindo-os e diminuindo o fluxo de água para o interior do solo (ALVES; CABEDA, 1999), resultando na antecipação do escoamento superficial.

Tabela 4.2. Tempo para o início do escoamento (T_i), taxa constante de escoamento (Tx_c), escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) em solo com palha na superfície em diferentes momentos do ciclo da cultura do feijão. Santa Maria, RS, 2014.

	Momento do ciclo da cultura*	Declividade do terreno								
		1 %			5 %			10 %		
		Intensidade da chuva (mm h^{-1})								
		35	70	105	35 ¹	70	105	35	70	105
T_i (min.)	1	--	12,50 b	10,33 ab	34,00 ab	12,60 b	9,33 b	8,13 a	6,23 a	6,00 ab
	2	41,94 b**	7,83 a	6,36 a	18,94 a	5,50 a	4,67 a	9,17 a	3,50 a	3,22 a
	3	71,50 c	13,50 b	13,94 b	35,50 ab	12,17 b	7,67 b	25,00 b	10,50 b	6,83 b
	4	79,67 d	24,17 c	23,00 c	62,33 c	23,17 c	14,07 c	51,67 c	19,00 c	12,67 c
Tx_c (mm h^{-1})	1	0,00 a	14,79 a	40,41 a	10,65 a	18,24 a	42,36 a	19,82 a	33,11 a	44,97 a
	2	4,59 b	20,40 a	46,83 a	15,91 a	48,71 b	58,29 b	17,64 a	49,88 b	68,57 b
	3	6,32 b	18,84 a	40,01 a	15,31 a	41,99 b	56,69 b	17,85 a	38,44 b	62,51 b
	4	6,57 b	22,17 a	50,46 b	9,88 a	35,51 b	61,48 b	21,55 a	36,52 b	65,48 b
E_t (mm)	1	0,00 a	26,47 a	69,05 a	12,12 ab	30,92 a	68,54 a	29,10 bc	59,02 b	76,94 a
	2	4,81 b	32,71 b	70,97 a	24,76 c	83,65 d	95,62 b	26,91 bc	89,77 c	122,47 c
	3	4,65 b	27,65 ab	62,43 a	16,02 b	60,15 c	82,61 ab	19,69 ab	55,80 b	94,70 b
	4	4,03 b	29,03 ab	67,47 a	7,12 a	44,01 b	92,65 b	16,65 a	42,10 a	81,13 ab
% E	1	0,00 a	18,68 a	32,32 a	18,89 b	21,54 a	32,12 a	37,01 c	42,04 b	36,19 a
	2	8,16 b	22,56 b	33,84 a	30,69 c	59,67 d	44,69 b	33,83 bc	62,55 c	58,39 c
	3	6,04 b	19,99 ab	30,02 a	20,29 b	41,28 c	39,57 ab	24,95 ab	39,77 b	45,36 b
	4	5,35 b	20,52 ab	32,06 a	9,55 a	30,74 b	43,69 b	21,06 a	29,77 a	38,57 ab

* Momento do ciclo da cultura 1, 2, 3 e 4 correspondem a aplicação da chuva simulada a 1, 16, 29 e 43 dias após a semeadura da cultura do feijão, respectivamente.

** Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para um mesmo indicador avaliado, não diferem entre si, pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 4.3. Tempo para o início do escoamento (T_i), taxa constante de escoamento (Tx_c), escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) em solo sem palha na superfície em diferentes momentos do ciclo da cultura do feijão. Santa Maria, RS, 2014.

	Momento do ciclo da cultura	Declividade do terreno								
		1 %			5 %			10 %		
		Intensidade da chuva (mm h^{-1})								
	35	70	105	35	70	105	35	70	105	
T_i (min.)	1	41,33 c*	6,70 c	6,43 c	25,80 c	5,67 b	5,73c	4,47 ab	4,10 c	3,27 b
	2	5,58 a	2,88 a	2,39 a	4,90 a	3,18 a	1,57 a	3,50 a	1,56 a	1,33 a
	3	10,03 ab	3,16 ab	2,67 ab	8,25 ab	2,94 a	1,83 ab	7,50 bc	2,31 ab	1,55 ab
	4	14,00 b	4,83 b	4,03 b	12,60 b	3,67 a	3,90 bc	11,13 c	3,33 bc	3,33 b
Tx_c (mm h^{-1})	1	17,20 a	42,12 a	69,52 a	18,13 a	46,60 a	79,64 a	27,96 a	50,63 a	81,72 a
	2	21,33 a	46,91 a	77,77 a	21,21 a	56,65 a	85,07 a	27,09 a	57,61 a	86,64 a
	3	22,02 a	42,60 a	65,68 a	20,83 a	55,63 a	82,75 a	23,69 a	49,85 a	82,60 a
	4	16,68 a	47,77 a	69,07 a	18,79 a	51,29 a	81,31 a	28,67 a	50,81 a	81,27 a
E_t (mm)	1	17,14 a	64,30 a	117,88 a	21,33 a	80,06 a	132,57 a	39,33 a	86,28 a	142,81 ab
	2	38,26 b	90,21 b	135,95 a	36,64 b	106,36 b	165,28 c	50,07 a	110,03 b	170,04 c
	3	34,18 b	79,72 ab	124,51 a	32,94 ab	99,84 ab	150,44 b	39,03 a	90,91 ab	154,31 bc
	4	21,57 a	79,64 ab	121,38 a	26,17 ab	90,81 ab	148,27 b	36,76 a	78,48 a	134,63 a
% E	1	22,02 a	45,36 a	55,18 a	33,27 a	55,77 a	62,13 a	50,02 a	61,46 ab	67,17 ab
	2	53,75 b	62,21 b	64,81 b	45,42 a	75,87 b	77,24 c	62,95 a	76,66 b	81,08 c
	3	44,41 b	57,64 ab	59,86 ab	41,71a	68,52 ab	72,06 bc	49,45 a	64,78 ab	73,91 bc
	4	28,64 a	56,21 ab	57,67 ab	35,09 a	63,44 ab	69,93 b	46,52 a	55,50 a	64,00 a

* Momento do ciclo da cultura 1, 2, 3 e 4 correspondem a aplicação da chuva simulada a 1, 16, 29 e 43 dias após a semeadura da cultura do feijão, respectivamente.

** Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para um mesmo indicador avaliado, não diferem entre si, pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Verifica-se que a presença de palha na superfície do solo foi mais efetiva no atraso do T_i do que a cobertura da superfície do solo pelo dossel do feijoeiro. Tal fato ocorre principalmente na intensidade de chuva de 35 mm h^{-1} , em que a presença de palha na superfície do solo promoveu um atraso de 66 e 50 minutos no início do escoamento, nas declividades de 1 e 5%, respectivamente. Corroborando com os resultados obtidos por Oliveira et al. (2013), em terreno com 5% de declividade o T_i foi atrasado em 31 e 35 minutos com a utilização de 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de palha na superfície do solo, respectivamente, em relação ao solo descoberto.

Para o solo com palha na superfície (Tabela 4.2), as variações na $T_{x.c}$ foram de 0 (intensidade de 35 mm h^{-1} na declividade de 1%) a $68,57 \text{ mm h}^{-1}$ (intensidade de 105 mm h^{-1} na declividade de 10%), com pouca influência da cobertura pelo dossel da cultura. Em alguns casos, principalmente nas maiores intensidades de chuva, observa-se um pequeno incremento na $T_{x.c}$ com o incremento do dossel. Isso ocorre, provavelmente, pela redução da porosidade de aeração do solo, que é responsável pela infiltração de água, em função do desenvolvimento do sistema radicular das plantas, onde as raízes passaram a ocupar uma significativa quantidade de poros nos quais antes infiltrava a água da chuva, resultando nos maiores valores de $T_{x.c}$.

A $T_{x.c}$ no solo sem palha na superfície (Tabela 4.3) também não foi alterada pela modificação no nível de cobertura do solo pelo dossel da cultura do feijão, diferente dos resultados obtidos por Bertol et al. (2008), que encontraram variação na $T_{x.c}$ durante o ciclo da cultura do feijão de 18 mm h^{-1} na semeadura direta tradicional à 44 mm h^{-1} no solo sem cultivo.

As variações na $T_{x.c}$ observadas neste trabalho foram de 16,68 (intensidade de 35 mm h^{-1} na declividade de 1%) a $86,64 \text{ mm h}^{-1}$ (intensidade de 105 mm h^{-1} na declividade de 10%), e são atribuídas aos fatores intensidade de chuva e declividade do terreno. Conforme Oliveira et al. (2013), maiores intensidades de chuva e acentuadas declividades do terreno, resultam em maiores taxa de escoamento superficial constante e menor tempo de início do escoamento superficial, implicando em maior perda de água por escoamento superficial.

O E_t no solo com palha na superfície (Tabela 4.2) foi reduzido com o aumento no nível de cobertura do solo pelo dossel da cultura do feijão. Nas maiores declividades do terreno e intensidades de chuvas essa redução chegou a 41,34 mm. Esse efeito está relacionado à capacidade da cobertura do solo pelo dossel vegetal

em amortecer o impacto da energia cinética das gotas de chuva e de amenizar o escoamento superficial, aumentando a infiltração da água no solo (MELLO et al., 2003). Enquanto que, no solo sem palha na superfície (Tabela 4.3), a variação do nível de cobertura do dossel da cultura do feijão exerceu pouca influência sobre os valores do E_t , não se identificando uma tendência clara. Engel et al. (2007) afirmam que o efeito que a cobertura do solo pelo dossel das plantas tem na redução da erosão e do escoamento durante o crescimento da cultura é menor do que o efeito da palha e irá depender de diversos fatores, tais como o tipo de planta, estágio fenológico, população de plantas e sequência de culturas.

As perdas de água por escoamento superficial variaram de 0 a 59,67% do volume total da chuva, no solo com palha na superfície (Tabela 4.2). A % E foi reduzida com o avanço do ciclo do feijão, especialmente nas maiores declividades do terreno. No solo sem palha na superfície (Tabela 4.3), não ficou evidente o efeito da cobertura do solo pelo dossel do feijão na % E, com perdas de água por escoamento de 22,02 a 81,08 % do volume da chuva. Em trabalho similar, Bertol et al. (2008), durante o ciclo do feijão encontraram perdas de água por escoamento de 7 e 34% do volume da chuva, quando da utilização ou não de palha sobre a superfície do solo, respectivamente.

Para as diferentes situações de estudo, os maiores valores de E_t e $T_{x.c}$ e, os menores T_i , foram observados na chuva aplicada no momento 2 do ciclo do feijão, quando as plantas cobriam 28% da superfície do solo. Este resultado está atrelado ao fato que três dias anteriores à aplicação dessa chuva, ocorreu uma chuva natural de 32 mm. Mesmo que no dia da aplicação da chuva (07/11/2011) a umidade na camada superficial não distinguia em relação às demais avaliações, a umidade das camadas inferiores do solo possivelmente estava superior, influenciando nos resultados. De acordo com Oliveira et al. (2013), elevado conteúdo de água no solo no início das chuvas, resulta em maiores taxas de escoamento superficial constante e menor tempo de início do escoamento superficial, implicando em maior perda de água por escoamento superficial.

De modo geral, a presença de palha na superfície do solo foi mais efetiva na redução das perdas de água por escoamento superficial que a cobertura da superfície do solo pelo dossel do feijoeiro. Para a $T_{x.c}$, as reduções proporcionadas pela presença de palha na superfície do solo foram superiores a 20 mm h^{-1} para as chuvas de 105 mm h^{-1} , aplicadas nas diferentes declividades do terreno. Nos valores

de E_t as reduções foram, em média, de 18, 39 e 60 mm para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente, representando uma redução na % E de 24, 27 e 28%, respectivamente. Desta forma, fica evidente que para aumentarmos o aproveitamento da água das chuvas é fundamental a adoção de sistemas de cultivo que visam à manutenção da palha na superfície do solo (COGO et al., 2003; CASSOL et al., 2004, SILVA et al. 2005; DELAUNE; SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013) e, a importância de estudos como este que propõem ajustes ao Método CN, melhorando a estimativa do escoamento superficial sobretudo para solos com elevadas quantidades de palha na superfície.

Na tabela 4.4 são apresentados os valores de T_i , $T_{x.c}$, E_t e % E estimados pelo Método CN para solos com e sem palha na superfície, em diferentes intensidades de chuva e os valores médios observados a campo, tendo em vista que o Método CN não considera o momento do ciclo da cultura e a declividade do terreno.

Tabela 4.4. Tempo para o início do escoamento (T_i), taxa constante de escoamento ($T_{x.c}$), escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) estimados pelo método CN e valores médios de campo, em solo com e sem palha na superfície, em diferentes intensidades de chuva. Santa Maria, RS, 2014.

	Com palha na superfície do solo			Sem palha na superfície do solo		
	Intensidade da chuva					
	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹
Valores estimados pelo Método Curva Número						
	CN = 65,8*			CN = 68,6*		
T_i (min.)	45,00	25,00	18,00	40,00	20,00	15,00
$T_{x.c}$ (mm h⁻¹)	14,18	48,22	84,96	16,19	51,16	88,08
E_t (mm)	26,82	62,54	106,80	23,41	75,50	119,09
% E	37,14	44,67	50,86	33,44	53,92	56,66
NSE - E_t	0,22	0,27	0,62	0,28	0,55	0,74
Valores médios observados						
T_i (min.)	39,80	12,56	9,84	12,42	3,42	3,17
$T_{x.c}$ (mm h⁻¹)	13,28	31,55	53,17	21,97	49,87	78,59
E_t (mm)	15,08	48,44	82,05	32,79	88,05	141,51
% E	19,62	34,09	38,90	42,77	61,95	67,09

* Valor de CN utilizado na estimativa pelo método CN.

Observa-se, tanto para o solo sem e com palha na superfície, uma superestimativa dos valores de T_i e de $T_{x.c}$ pelo método CN, em todas as intensidades de chuva. No solo com palha na superfície, os valores de E_t e % E foram superestimados pelo método CN em todas as intensidades de chuva. Esta

superestimativa foi de 12, 14 e 25 mm ou 17, 10,5 e 12%, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Em condições de trabalho semelhantes, Carlesso et al. (2011) encontraram superestimativa do escoamento superficial em 34% com o método CN. Segundo Souza et al. (1995), esta superestimativa deve-se ao fato de que este método não considera especificamente os sistemas de manejo do solo que normalmente são empregados em áreas agrícolas. Todavia, para o solo sem palha na superfície, os valores de E_t e % E foram subestimados pelo Método CN em 9, 13 e 22 mm ou 9, 8 e 10%, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

Com isso, verifica-se a dificuldade do método CN em predizer o escoamento superficial, especialmente para o solo com palha na superfície, evidenciado pelo desempenho do modelo através do índice NSE (Tabela 4.4), em que em todas as condições analisadas ficou no máximo como aceitável (0,36 > NSE < 0,75), mas que se apresentou inferior no solo com palha (NSE de 0,22 a 0,62) em comparação ao solo sem palha (NSE de 0,28 a 0,74).

Este fato revela a influência do sistema de manejo do solo sobre o escoamento superficial, demonstrando a sua utilidade como instrumento para conservação da água e do solo. Diante do exposto, fica evidente a necessidade de se ajustar o método CN às condições específicas de manejo do solo, para sua adoção com segurança na estimativa do escoamento superficial. No sentido de propor um melhor ajuste entre o escoamento superficial estimado pelo método CN e o observado à campo, identificou-se o valor ideal da CN, de forma que o coeficiente de Nash e Sutcliffe atingisse valor máximo para aquele grupo de dados. Os valores ajustados de CN, bem como de T_i, Tx_c, E_t e % E obtidos após o ajuste estão apresentados na tabela 4.5.

Verifica-se uma tendência de superestimativa das variáveis analisadas (T_i, Tx_c, E_t e % E) pelo método CN ajustado. Contudo, com uma melhora na predição do escoamento superficial, tendo em vista a melhoria do índice NSE que variou de 0,45 a 0,83 para o solo com palha e, de 0,71 a 0,92 para o solo sem palha na superfície. A superestimativa do E_t, no solo com palha na superfície, foi de 0,7, 7 e 11 mm, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Enquanto que, para o solo sem palha na superfície, foi de apenas 0,4, 3 e 10 mm, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. A redução do erro

na estimativa do escoamento acumulado, após o ajuste do Método CN, foi de até 14 mm para o solo com palha na superfície.

Tabela 4.5. Tempo para o início do escoamento (T_i), taxa constante de escoamento (Tx_c), escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) estimados após o ajuste do método CN e valores médios de campo, em solo com e sem palha na superfície e em diferentes intensidades de chuva. Santa Maria, RS, 2014.

	Com palha na superfície do solo			Sem palha na superfície do solo		
	Intensidade da chuva					
	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹
Valores estimados pelo Método Curva Número						
CN_{aj}	71	67	61	85	84	82
T_i (min.)	45,00	20,00	19,00	20,00	10,00	5,00
Tx_c (mm h⁻¹)	17,93	49,50	79,03	28,16	64,31	99,39
E_t (mm)	15,85	55,06	92,71	33,19	91,04	151,30
% E	22,65	39,33	44,15	47,41	67,89	72,04
NSE - E_t	0,45	0,58	0,83	0,71	0,78	0,92
Valores médios observados						
T_i (min.)	39,80	12,56	9,84	12,42	3,42	3,17
Tx_c (mm h⁻¹)	13,28	31,55	53,17	21,97	49,87	78,59
E_t (mm)	15,08	48,44	82,05	32,79	88,05	141,51
% E	19,62	34,09	38,90	42,77	61,95	67,09

Onde: CN_{aj}: Valor ajustado da Curva Número utilizado na estimativa pelo Método Curva Número. NSE - E_t: coeficiente de Nash e Sutcliffe, comparando o escoamento total estimado e observado.

Desta forma, os valores ideais do parâmetro CN para o solo com palha na superfície são 71, 67 e 61, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Enquanto que, os valores ideais do parâmetro CN para o solo sem palha na superfície são de 85, 84 e 82, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

Novos valores de CN também foram determinados por Wang; Huang (2008), para o milho, alfafa e sorgo, usando o escoamento medido para calcular os valores de CN. Estudos semelhantes também foram realizados por Jin et al. (2003), Zhang et al. (2004) e Gao et al. (2006). Os resultados desses estudos indicaram que o valor de CN padrão do Método superestima o escoamento para alguns tipos de uso do solo e subestimativa para os outros.

Os resultados de campo obtidos neste trabalho ressaltam a importância da cobertura da superfície do solo desde antes da implantação dos cultivos. Pois, a magnitude e o comportamento do escoamento superficial serão definidos nos

eventos de chuva no início do ciclo da cultura e, caso o solo estiver descoberto, estes eventos poderão comprometer a qualidade físico-hídrica da superfície do solo, refletindo ao longo de todo desenvolvimento posterior do cultivo e, neste caso, o incremento da cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas cultivadas acaba exercendo pouca ou nenhuma influência na atenuação do escoamento superficial.

Além disso, pode-se observar que o método CN representa as perdas de água por escoamento superficial, com uma subestimativa dos valores em solo sem palha e superestimativa em solo com palha, sendo estas superiores para as maiores intensidades de chuvas. Contudo, o ajuste proposto ao método às condições de palha e intensidades de chuvas resulta em menores erros na estimativa do escoamento para todas as situações avaliadas. Todavia, esse resultado implica no manejo de irrigação, pois a superestimativa do escoamento resulta na subestimativa da chuva efetiva, o que pode demandar irrigações mais frequentes do que a real necessidade, implicando em custos adicionais e utilização desnecessária de água.

CONCLUSÕES

A cobertura da superfície do solo por palha foi mais efetiva na redução das perdas de água por escoamento superficial que a cobertura do solo pelo dossel vegetativo do feijoeiro.

A presença de palha na superfície do solo reduziu o escoamento superficial em 45%, observada na intensidade de chuva de 35 mm h^{-1} e declividade do terreno de 1%. Em maior intensidade de chuva (105 mm h^{-1}) e declividade do terreno (10%) essa redução foi de 30%.

Valores elevados de escoamento superficial (81% do volume aplicado) foram observados no momento 2 da cultura do feijão (28% de cobertura do solo), para o solo sem palha na superfície, em acentuada declividade do terreno (10%) e intensidade de chuva (105 mm h^{-1}).

O método CN subestimou o escoamento superficial em solo sem palha, chegando a 22 mm ou 10% e, superestimou em solo com palha na superfície, chegando a 25 mm ou 17%, especialmente nas maiores intensidades de chuva (105 mm h^{-1}).

Os valores ajustados do método CN são de 85, 84 e 82 para o solo sem palha na superfície e, de 71, 67 e 61 para o solo com palha na superfície são, nas intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

O método CN ajustado para as condições de palha (sem e com) e intensidades de chuvas (35, 70 e 105 mm h⁻¹) superestimou o escoamento superficial em 10 mm para o solo sem palha e em 11 mm para o solo com palha na superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do Número de Curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Revista Irriga**, Edição Especial, p. 264 - 279, 2012.

BANASIK, K., WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. **2nd Joint Federal Interagency Conference**, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agrônômica**, vol. 36, n. 1, jan.-abr., p. 24 - 33, 2005.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; FABIAN, E. L.; PEGORARO, R.; ZAVASCHI, E.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háplico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243 - 250, 2008.

BERTOL, O.J.; RIZZI, N.E.; BERTOL, I. & ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 31, p.781-792, 2007.

CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774 - 3789, 2011.

CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, n. 98, p. 1020 - 1026, 2011.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 685-690, 2004.

CEPEF - Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão. **Indicações técnicas para a cultura do feijão no Rio Grande do Sul 2007/08**. Pelotas, 2007. 110p.

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**, 27:743-753, 2003.

DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p.

DELAUNE, P.B.; SIJ, J.W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.32–35, 2012.

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENGEL, L. F.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; COGO, N. P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. **Scientia Agricola Journal**, v. 64, n. 2, p. 187 - 193, 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n. 6, p. 1039 - 1042, 2011.

GAO, Y.; ZHU, B.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. Z. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of Purple soil. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, v. 22, n. 11, p. 396–400, 2006.

HUANG, J.; ZHAO, X.; WU, P. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events. **Journal of Soil and Water Conservation**. July/August vol. 68 no. 4 283-295, 2013.

HUANG, M.; GALLICHAND, J. 2; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, 20, 579–589, 2006.

JACOBS, J. H., SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

JIN, H.; SUN, X. H.; LI, Y. B. Application of SCS model in Lanhe watersheds. **Journal Taiyuan University of Technology**, v. 34, n. 6, p. 735–736, 2003.

LIMA, H. M.; VARGAS, H. CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 3, p. 525 - 536, 2007.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147 - 155, 2003.

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

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DE DAVID, G.; SANTA, C. D. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1308 - 1315, 2007.

MISHRA, S. K. AND SINGH, V. P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 1-4020-1132-6, 2003.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P.; RANVIR SINGH. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 301 - 322, 2006.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524–534, 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through. Part I. A conceptual models discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282 - 290, 1970.

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

NRCS (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). **National Engineering Handbook**, Part 630 Hydrology, U.S. Department of Agriculture, 2009.

OLIVEIRA Z, B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A.E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Revista Irriga**, v. 18, n. 3, p. 415 - 425, 2013.

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 140 - 147, 2010.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006.

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

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2008. 88p.

RAHMAN, M. M.; ISLAM, M. O; HASANUZZAMAN, M. Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh. **World Journal of Agricultural Sciences**. v.4; p. 453-457, 2008

SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; BÔAS, M. A. V.; OLIVEIRA, L. F. C. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 210-213, 2000.

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

SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S. 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 - 1230, 2001.

SOUZA, J. L, LOMBARDI NETO, F, TUBELIS, A. Estimativa e análise do escoamento superficial em solo descoberto e cultivado com a sucessão soja e trigo, sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 77-84, 1995.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R., GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G., PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, n.1, 2009.

SRIWONGSITANON, N.; TAESOMBAT, W. Effects of land cover on runoff coefficient. **Journal of Hydrology**. v.410, p. 226–238. 2011,

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388–403, 2008.

USDA-SCS (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture). **National Engineering Handbook**, USDA, 1972.

WANG, Y.; HUANG, M. B. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau. **Bulletin Soil Water Conservation**, v. 28, n.1, p. 54–58, 2008.

ZHANG, M. H.; WANG, X. Y.; QIN, F. L. Application of SCS model to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County. **Journal of Capital Normal University** (Natural Science Edition), v. 25, n. 1, p. 155 - 158, 2004.

ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DURANTE O CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO MILHO

RESUMO: Os sistemas de manejo do solo modificam o seu balanço hídrico, podendo favorecer o escoamento superficial de água. Esse trabalho teve como objetivo determinar o escoamento superficial em diferentes momentos do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, cultivado em solo com e sem palha na superfície, em distintas declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas e, comparar os resultados com a estimativa do escoamento superficial pelo método Curva Número (CN). Para isso, realizou-se um experimento de campo em área experimental do Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria, RS, no ano agrícola 2011/12, em que foram aplicadas diferentes intensidades de chuvas simuladas (35, 70 e 105 mm h⁻¹), em distintos momentos do ciclo da cultura do milho (0, 30, 72 e 100% de cobertura do solo) e declividades do terreno (1, 5 e 10%), em solo com e sem palha na superfície. Quantificaram-se o escoamento total (E_t) e a porcentagem de escoamento em relação ao volume da chuva (% E). Realizou-se a estimativa do E_t pelo método CN e ajustes nos valores de CN, a partir do coeficiente Nash e Sutcliffe para melhorar as estimativas do escoamento superficial. Os maiores valores de escoamento superficial (68,13%) foram observados quando a cultura do milho cobria 100% da superfície, para o solo sem palha na superfície, em acentuada declividade do terreno (10%) e intensidade de chuva (105 mm h⁻¹). O método CN superestimou o escoamento superficial para as diferentes intensidades de chuva (35, 70 e 105 mm h⁻¹) e condição de palha na superfície do solo (com e sem). Contudo, o ajuste proposto ao método CN resultou em melhores estimativas do escoamento superficial. Os resultados deste estudo evidenciam a importância do ajuste do Método CN para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas.

Palavras-chave: palha, dossel vegetal, declividade do terreno, *Zea mays*.

DETERMINATION AND ESTIMATE OF RUNOFF DURING THE DEVELOPMENT OF MAIZE CYCLE

ABSTRACT: The soil tillage systems modify their water balance and may promote water runoff. The objective of this study was to determine the runoff at different stages of maize crop in soil with and without straw on the surface, in different land slope and intensity of rainfall simulator, and compare the results with the runoff estimated by the Curve Number method (CN). For this, we carried out a field experiment in an experimental area of the Federal University of Santa Maria, RS, during the agricultural year 2011/12, where different intensities of simulated rainfall (35, 70 and 105 mm h⁻¹) were applied, at different times of the maize crop cycle (0, 30, 72 and 100% soil cover) and land slope (1, 5 and 10%) in soil with and without straw on the surface. Quantified the total runoff (E_t) and the percentage of runoff in relation to the volume of precipitation (% E). Was estimated E_t by CN method and adjustments in the values of CN, from Nash and Sutcliffe coefficient to improve estimates of runoff. The highest values of runoff (68.13 %) were observed when the maize crop covered 100% of the surface to the soil surface without straw in steep terrain slope (10%) and intensity of precipitation (105 mm h⁻¹). The CN method overestimated the runoff for different rainfall intensities (35, 70 and 105 mm h⁻¹) and condition of straw on the soil surface (with and without). However, the method proposed adjustment resulted in better estimates of runoff. The results of this study highlight the importance of adjusting the Curve Number Method for estimating runoff in agricultural areas.

Keywords: straw, plant canopy, land slope, *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

O manejo correto dos recursos naturais é um aspecto importante para se manter a atividade agrícola mais estável e sustentável, aumentando a eficiência e contribuindo para a preservação do meio ambiente, além de ser uma alternativa para melhorar a produção de alimentos em nível mundial. Assim, a busca de tecnologias e informações que contribuam para um adequado manejo do solo e da água faz-se cada vez mais necessárias, especialmente visando à melhor utilização da água das chuvas.

A irrigação é uma técnica utilizada para minimizar as perdas na produção de cultivos agrícolas por deficiência hídrica, entretanto, para uma produção sustentável não basta ter somente o equipamento de irrigação, a mesma deve ser manejada para evitar desperdícios de água e aumentar a eficiência deste recurso hídrico. Para isso, a determinação do escoamento superficial é fundamental para a identificação da quantidade da água da chuva que realmente estará contribuindo para o desenvolvimento das culturas, denominada de chuva efetiva.

As características da chuva, os diferentes tipos de manejo de solo e cultura, a cobertura do solo e a declividade do terreno são alguns dos aspectos que influenciam o escoamento superficial de água no solo (PANACHUKI et al., 2006; BERTOL et al., 2007; ENGEL et al., 2007; BERTOL et al., 2008; PRUSKI et al., 2008; SPOHR et al., 2009; BANASIK, K.; WOODWARD, D., 2010; CAO et al., 2011; CARLESSO et al., 2011; MUÑOZ-ROBLES et al., 2011; PANACHUKI et al., 2011).

Como a avaliação do escoamento superficial a partir de chuvas naturais requer vários anos de medidas para obter-se uma amostragem representativa dos eventos (SPOHR, et al., 2009), intensificaram-se os estudos utilizando chuvas artificiais produzidas por simuladores de chuva (SILVA et al., 2001; ELTZ et al., 2001), como é o caso dos trabalhos desenvolvidos recentemente por Huang et al. (2013) e Oliveira et al. (2013).

Trabalhando com diferentes intensidades de chuva simulada (0,5, 0,75, 1, 1,5, e 2 mm min⁻¹), Huang et al. (2013) observaram que houve uma relação linear positiva entre a intensidade média do escoamento e a intensidade da chuva. Em trabalho realizado com diferentes intensidade de chuvas simuladas em área de integração agricultura-pecuária, Panachuki et al. (2006) relatam que as perdas de solo e de água aumentam com a aplicação de intensidades de chuvas mais elevadas. Semelhantemente, Oliveira et al. (2013), Carlesso et al. (2011) e Spohr et al. (2009) afirmam que um aumento na intensidade da chuva causa redução no tempo de início do escoamento e, conseqüentemente, maior é a taxa constante de escoamento. Outro fator que contribui para as perdas de água por escoamento superficial é a declividade do terreno: quanto mais acentuada a declividade do terreno maior será o volume de escoamento superficial (OLIVEIRA et al., 2010; CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013, HUANG et al., 2006). Por outro lado, a presença de palha na superfície do solo causa redução nas perdas de água por escoamento superficial (CASSOL et al., 2004; PANACHUKI et al., 2011; DELAUNE;

SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

Os efeitos da cobertura vegetal sobre o escoamento superficial ainda não estão bem explicados. Huang et al. (2013), avaliando o escoamento superficial em solo com diferentes coberturas vegetais (*Medicago sativa* L., *Triticum aestivum* L., *Lolium perenne* L.) observou uma relação exponencial negativa entre a intensidade do escoamento médio e a cobertura vegetal. Bertol et al. (2008), avaliando o escoamento superficial a partir de chuvas simuladas em diferentes sistemas de manejo do solo durante o ciclo de desenvolvimento de milho, feijão e soja, observaram que as variáveis taxa constante de enxurrada, o coeficiente de escoamento e o volume de enxurrada são mais influenciadas pelos sistemas de manejo do solo do que pelo tipo de cultivo. Para Engel et al. (2007), as perdas de solo são bem explicadas pelos resíduos culturais deixados pelo cultivo anterior, pela cobertura do dossel da planta e o tipo de preparo do solo, enquanto as diferenças no tempo de início de escoamento, a taxa de escoamento e perda de água entre os tratamentos foram menos relacionadas a esses fatores.

Para estimativa do escoamento superficial uma das metodologias mundialmente utilizadas é o método CN, proposto pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (SCS-USDA, 1972; MISHRA et al., 2006; JACOBS; SRINIVASAN, 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al. 2013). O método CN baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI et al., 2008; MISHRA et al., 2003).

Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura (LIMA et al., 2007). Porém, essa metodologia necessita de ajuste para as condições de manejo do solo com utilização do sistema de plantio direto com elevadas quantidades de palha sobre a superfície do solo, comuns na região Sul do Brasil. Segundo Carlesso et al. (2011), este método superestima o escoamento superficial acumulado, resultando em menor eficiência do uso da água de irrigação e em consumo de energia pela aplicação

desnecessária de água aos cultivos, sendo que, para ser usado de forma satisfatória, este método necessita de ajustes que considerem as práticas de manejo do solo e dos cultivos.

Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo determinar o escoamento superficial em diferentes momentos do ciclo da cultura do milho, cultivado em solo com e sem palha na superfície, em distintas declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas e, comparar os resultados com a estimativa do escoamento superficial pelo método CN.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria-RS, situada em Latitude 29°41'24"S, Longitude 53°48'42"W e altitude de 105 metros. O clima da região é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

O experimento foi instalado a campo no ano agrícola 2011/12, em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. Foram aplicadas chuvas simuladas em diferentes momentos do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, denominados momentos 1, 2, 3 e 4, os quais correspondem a aplicação da chuva simulada a 1, 21, 35 e 49 dias após a semeadura, quando o dossel das plantas de milho cobria 0, 30, 72 e 100% da superfície do solo, respectivamente.

A cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas de milho foi determinada através do método das interseções ou do ponto quadrado, com auxílio de um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m com linhas fixadas a cada 0,05 m em todos os lados, formando uma grade de 100 pontos nos locais de intersecção das linhas. As avaliações foram realizadas com o auxílio de fotografias digitais, obtidas com câmeta digital instalada a aproximadamente 1,7 m acima da superfície do solo. Nas fotografias foram contabilizadas as intersecções que se sobrepunham ao dossel do milho.

O experimento foi conduzido em diferentes declividades do terreno (1, 5 e 10%), quantidades de palha na superfície do solo (0 e 5 Mg MS ha⁻¹ de palha de aveia preta) e intensidades de chuva simulada (35, 70 e 105 mm h⁻¹).

As declividades foram delimitadas de acordo com a topografia natural da área, determinadas com o auxílio de um nível de mangueira, sendo que, em cada declividade foram demarcados três locais, totalizando 9 locais, onde foram aplicadas as chuvas simuladas nos diferentes momentos do ciclo da cultura do milho. Em cada local, foram instaladas seis parcelas, totalizando 54, com dimensões de 1 x 1 m cada, delimitadas com chapas metálicas cravadas no solo e contendo na parte inferior uma calha, para a coleta da água de escoamento superficial, conforme ilustrado na figura 4.1.

A palha utilizada foi oriunda de plantas de aveia preta, que foram previamente dessecadas, cortadas próximo ao solo e secas ao Sol. Posteriormente, após a retirada cuidadosa da vegetação espontânea das parcelas experimentais, esta palha foi distribuída de acordo com a quantidade de massa seca desejada.

As chuvas simuladas foram aplicadas por um simulador estacionário desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA-ARS, EUA (NORTON; BROWN, 1992), constituído por seis aspersores oscilantes instalados a 2,45 metros acima da superfície do solo, com pressão de saída da água mantida em 41,4 KPa (6,0 psi ou 4,22 mca). A intensidade da chuva foi aferida em cada avaliação através de pluviômetros instalados acima do dossel vegetal, ao lado das parcelas experimentais, admitindo-se uma variação de até 5%, em função da modificação das condições ambientais, principalmente da velocidade do vento.

Todas as chuvas simuladas foram aplicadas em condições de umidade do solo muito semelhantes, sendo a umidade inicial média na camada de 0 - 0,1 m de 0,08 g g⁻¹ e a umidade final, após a aplicação das chuvas, de 0,31 g g⁻¹.

A semeadura da cultura do milho foi realizada em 09 de janeiro de 2012, em sentido transversal à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se o híbrido P1630H, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e população de 70.000 plantas ha⁻¹. Os tratos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações de Rodrigues; Silva (2011).

O início do escoamento superficial foi considerado quando a superfície do solo da parcela apresentava-se encharcada e um filete contínuo de água começava

a escoar na calha coletora. Uma vez iniciado o escoamento, realizava-se a coleta dos volumes de água escoados em intervalos de cinco minutos durante 120 minutos para cada intensidade de chuva simulada. O volume de escoamento total (E_t , mm) foi determinado pelo somatório dos volumes escoados, até 120 minutos de chuva e, a porcentagem de escoamento (% E) foi obtida pela razão entre o escoamento total e o volume total da chuva multiplicado por 100.

Após a conclusão do experimento foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e deformada para caracterização físico-hídrica do solo, nas camadas de 0 a 0,05; 0,05 a 0,15; 0,15 a 0,25 e, 0,25 a 0,55 m de profundidade do perfil, sendo todas as análises realizadas no Laboratório de Análises Físicas de Solo do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria.

Para estimativa do escoamento superficial pelo método CN seguiu a metodologia descrita em SOUZA et al. (1995); MISHRA et al. (2006), PRUSKI et al. (2008) e NRCS (2009). Considerou-se o solo como pertencente ao grupo hidrológico C e uso do solo com cultivo em fileiras com curvas de nível. Quando da utilização de palha sobre a superfície do solo a condição hidrológica foi considerada boa e, quando da ausência de palha esta foi considerada má. Em ambos casos, o valor da Curva Número foi corrigido para uma condição de umidade antecedente AMC I, pois nos 5 dias antecedentes a aplicação das chuvas simuladas o somatório das chuvas e irrigações foi menor que 35 mm.

Conforme estas condições, o valor de CN adotado foi de 65,8 para o solo com palha na superfície e, de 68,6 para o solo sem palha. Cabe salientar, que o método CN não permite estimar individualmente o escoamento para cada um dos quatro níveis de cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas de milho, por não considerar este nível de detalhamento.

No sentido de propor um melhor ajuste entre o escoamento superficial estimado pelo método CN e o observado a campo, identificou-se o valor ideal de CN, de forma que o coeficiente de Nash e Sutcliffe atingisse valor máximo para aquele grupo de dados. De acordo com Machado et al. (2003), o coeficiente de Nash e Sutcliffe é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos. Este coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE fica entre 0,36 e

0,75. O NSE, além de traduzir a similaridade da variabilidade entre duas variáveis, é um indicador da similaridade de quantificação, o que é considerado bastante relevante na avaliação de confiança e eficiência na modelagem (ARAÚJO NETO et al., 2012). O coeficiente de Nash e Sutcliffe é pela equação 4.1 (MACHADO et al., 2003).

Para a avaliação dos valores de escoamento ajustados com os valores propostos de CN foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular (b), o erro médio (ME) (Equação 5.1) e a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) (Equação 5.2). O valor de "b" o mais próximo de 1, indica que o modelo não apresenta uma tendência de superestimativa ou subestimativa dos dados. O ME é uma variável que indica a direção média dos desvios de um conjunto de dados estimados a partir de um conjunto de valores observados. Este valor indica a tendência, se o modelo está superestimando (ME positivo) ou subestimando (ME negativo). O RMSE dá a medida do erro médio que está sendo cometido (WILKS, 1995).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (\text{Equação 5.1})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (\text{Equação 5.2})$$

Em que: O_i e P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) representam pares de valores observados e simulados para uma determinada variável; \bar{O} e \bar{P} são os valores médios, respectivamente.

As variáveis (E_t e % E) foram submetidas a análise da variância e as médias foram comparados entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando o pacote estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização físico-hídrica do solo em que foi conduzido o experimento são apresentados na tabela 5.1. Os valores da composição granulométrica (textura) são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 5.1. Parâmetros da caracterização físico-hídrica do solo da área experimental. Santa Maria, RS, 2014.

Camada do solo (m)	Ds (g cm ⁻³)		PT (cm ³ cm ⁻³)		Microp. (cm ³ cm ⁻³)		Macrop. (cm ³ cm ⁻³)	
	C/ palha	S/ palha	C/ palha	S/ palha	C/ palha	S/ palha	C/ palha	S/ palha
0 - 0,05	1,24 b*	1,37 a	0,51 a	0,46 b	0,33 a	0,33 a	0,18 a	0,13 b
0,05 - 0,15	1,38 a	1,40 a	0,46 a	0,45 a	0,33 a	0,35 a	0,13 a	0,10 a
0,15 - 0,25	1,37 a	1,36 a	0,46 a	0,46 a	0,33 a	0,34 a	0,13 a	0,12 a
0,25 - 0,55	1,32 a	1,30 a	0,48 a	0,48 a	0,33 a	0,33 a	0,15 a	0,15 a

Onde: Ds: Densidade do solo; PT: Porosidade total; Microp.: Microporosidade do solo; Macrop.: Macroporosidade do solo; C/ palha: Solo com palha na superfície (5 Mg ha⁻¹) e S/ palha: solo sem palha na superfície.

* Médias seguidas pela mesma letra na linha, para um mesmo indicador avaliado, não diferem entre si, pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Observa-se na tabela 5.1 que na camada de 0 - 0,05 m, a ausência de palha na superfície do solo resultou em aumento na densidade do solo e redução na porosidade total, em função da redução da macroporosidade, indicando possível selamento ou entupimento dos poros nesta camada.

O selamento superficial é causado pelo impacto direto das gotas de água sobre a superfície do solo, sendo resultante de processos complexos e dinâmicos, nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura coesa, afetando as propriedades físicas do solo, principalmente a densidade e a macroporosidade, influenciando acentuadamente as condições de infiltração e de escoamento superficial (PANACHUKI et al., 2006; ZONTA et al., 2012).

O solo pertence à classe textural franco e apresenta densidade em todas as camadas avaliadas menor que a considerada crítica para solos nesta faixa de argila, que é de 1,6 g cm⁻³; bem como, apresenta valores de macroporosidade acima de 0,1 cm³ cm⁻³, valor crítico ao desenvolvimento das raízes da maioria das culturas (MICHELON et al., 2007).

Na tabela 5.2 são apresentados os valores de escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) em diferentes momentos do ciclo da cultura do milho, nas diferentes declividades do terreno e intensidades de chuvas, para o solo com e sem palha na superfície.

Observa-se um aumento no E_t com o desenvolvimento da cultura do milho, independente da presença ou não de palha na superfície do solo. Contudo, esse aumento foi maior no solo sem palha, como pode-se observar para a declividade de 10% e intensidade de chuva de 105 mm h⁻¹, em que houve um acréscimo de 63,97 mm no E_t do momento 1 para o 4, enquanto que, no solo com palha, o acréscimo foi de 54,54 mm na mesma situação.

Estes resultados contrariam o afirmado por Mello et al. (2003), Bertol et al. (2007, 2008), de que a cobertura do solo pelo dossel vegetal amortece o impacto da energia cinética das gotas de chuva e reduz o escoamento superficial. Contudo, neste trabalho, o fato do escoamento superficial aumentar com o desenvolvimento da cultura do milho, deve-se possivelmente ao selamento dos poros superficiais do solo ocorrido durante a primeira chuva (momento 1 com 0% de cobertura da superfície do solo pelo dossel).

O incremento do escoamento superficial com o aumento da cobertura do solo pelo dossel vegetativo do milho também pode ter sido causado pela redução da porosidade de aeração do solo (macroporosidade), que é responsável pela infiltração de água e, pelo aumento na densidade do solo, verificados para o solo sem palha sobre a superfície (Tabela 5.1). Outro aspecto refere-se ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas com o avanço do ciclo da cultura, pois as raízes passaram a ocupar uma significativa quantidade de poros superficiais nos quais antes infiltrava a água da chuva, resultando nos maiores valores de escoamento.

Para Carvalho et al. (2002), o efeito integrado da energia cinética do impacto das gotas d'água e a força cisalhante do escoamento superficial, atuam na desagregação, desprendimento e arraste das partículas do solo. Com a infiltração da água, acomodam-se nos poros, obstruindo-os e diminuindo o fluxo de água para o interior do solo (ALVES; CABEDA, 1999), resultando no incremento do escoamento superficial. Panachuki et al. (2011) afirmam que tanto o impacto das gotas de chuva quanto a ação cisalhante da enxurrada modificam as condições físicas da superfície do solo, como a rugosidade e a porosidade e, conseqüentemente, afetam o escoamento superficial.

Na intensidade de chuva de 35 mm h^{-1} foi observado a ausência de E_t no solo com palha na superfície, indicando para baixas intensidades de chuva a eficácia no controle do escoamento superficial de sistemas de manejo do solo que visam a manutenção da palha sobre a superfície, como o sistema de plantio direto, pois a cobertura do solo mantém a infiltração de água em níveis mais elevados, sendo o fator mais importante que influencia as taxas de infiltração e de escoamento da água da chuva (COGO et al., 2003; CASSOL et al. 2004, SILVA et al. 2005; DELAUNE; SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

Tabela 5.2. Escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) em diferentes momentos da cultura do milho, declividades do terreno, intensidades de chuva simuladas e presença de palha na superfície do solo. Santa Maria, RS, 2014.

		Declividade do terreno								
		1%			5%			10%		
		Intensidade da chuva (mm h^{-1})**								
Momentos do ciclo da cultura*		35	70	105	35	70	105	35	70	105
Com palha na superfície do solo										
E_t (mm)	1	0,00 a***	0,00 a	7,12 a	0,00 a	0,00 a	7,52 a	0,00 a	0,00 a	16,89 a
	2	0,00 a	0,00 a	15,68 a	0,00 a	0,00 a	31,10 b	0,00 a	0,00 a	44,40 b
	3	0,00 a	0,00 a	36,00 b	0,00 a	4,67 b	69,64 c	0,00 a	28,01 b	63,73 c
	4	0,00 a	15,24 b	52,51 c	0,00 a	9,11 c	69,91 c	0,00 a	30,16 b	71,43 c
% E	1	0,00 a	0,00 a	3,48 a	0,00 a	0,00 a	3,63 a	0,00 a	0,00 a	8,21 a
	2	0,00 a	0,00 a	7,59 a	0,00 a	0,00 a	14,57 b	0,00 a	0,00 a	21,48 b
	3	0,00 a	0,00 a	16,83 b	0,00 a	3,27 b	33,10 c	0,00 a	19,59 b	29,59 c
	4	0,00 a	10,71 b	25,20 c	0,00 a	6,55 c	33,25 c	0,00 a	21,50 b	34,13 c
Sem palha na superfície do solo										
E_t (mm)	1	0,00 a	34,58 a	54,37 a	0,00 a	20,47 a	79,93 a	0,00 a	27,81 a	78,59 a
	2	0,00 a	47,32 ab	100,47 b	0,00 a	44,25 b	133,44 b	0,00 a	46,49 b	131,31 b
	3	0,00 a	53,39 b	118,89 c	4,71 b	44,13 b	136,21 b	14,81 b	65,58 c	136,48 b
	4	0,00 a	72,20 c	116,58 c	23,16 c	61,35 c	142,34 b	19,72 c	70,00 c	142,56 b
% E	1	0,00 a	25,29 a	26,58 a	0,00 a	14,63 a	38,63 a	0,00 a	19,97 a	38,21 a
	2	0,00 a	33,17 ab	48,61 b	0,00 a	32,96 b	62,50 b	0,00 a	33,53 b	63,51 b
	3	0,00 a	36,22 b	55,58 c	6,37 b	30,84 b	64,74 b	19,49 b	45,88 c	63,37 b
	4	0,00 a	50,75 c	55,94 c	32,11 c	44,11 c	67,70 b	27,27 c	49,89 c	68,13 b

* Momento do ciclo da cultura 1, 2, 3 e 4 correspondem a aplicação da chuva simulada a 1, 21, 35 e 49 dias após a semeadura da cultura do milho, respectivamente.

** A intensidade das chuvas de 35, 70 e 105 mm h^{-1} correspondem a um volume de água aplicado de 70, 140 e 210 mm, respectivamente.

*** Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para um mesmo indicador avaliado, não diferem entre si, pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

A presença de palha na superfície do solo também contribuiu para a atenuação dos valores de E_t nas maiores declividades do terreno e intensidades de chuva. Segundo Oliveira et al. (2013) e Huang et al. (2013), a magnitude do escoamento superficial vai depender, principalmente, da cobertura do solo, da intensidade da chuva e da declividade da superfície do solo.

As mesmas tendências verificadas para o E_t ocorrem para a % E. Os maiores valores da % E são observados no momento 4 do ciclo da cultura do milho, para o solo sem palha na superfície, em acentuadas declividades do terreno (10%) e intensidades de chuva (105 mm h^{-1}).

No solo com palha, houve um incremento de até 29,63% dos valores da % E do momento 1 para o momento 4, enquanto que, no solo sem palha, esse incremento foi de até 32,11%. Para uma mesma intensidade de chuva e classe de declividade do terreno a presença de palha na superfície do solo reduziu em até 47,93% os valores de escoamento. Em trabalho similar, Bertol et al. (2008), durante o ciclo do milho, encontraram redução de 11% nas perdas de água por escoamento quando da utilização de palha sobre a superfície do solo.

De acordo com Engel et al. (2007), o efeito da palha na redução do escoamento durante o crescimento da cultura é maior que o efeito da cobertura do solo pelo dossel das plantas. Ainda, de acordo com estes autores, a cobertura do solo pelo dossel das plantas geralmente tem maior efeito na redução do escoamento superficial no preparo convencional, ou seja, com o solo descoberto.

Na tabela 5.3 são apresentados os valores médios de E_t e % E observados à campo, estimados pelo método CN e ajustados com valores propostos de CN. Ao compararmos os valores médios de E_t e % E determinados à campo com os estimados pelo método CN, no solo com palha na superfície observa-se uma superestimativa de 10,82, 45,27 e 66,31 mm ou 15,46, 32,4 e 31,61% para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h^{-1} , respectivamente. Enquanto que, no solo sem palha na superfície, observa-se uma superestimativa de 8,21; 9,54 e 0,83 mm ou 12, 7 e 0,35%, nas intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h^{-1} , respectivamente.

Em condições de trabalho semelhantes, Carlesso et al. (2011), encontraram superestimativa do escoamento superficial em 34% com o método CN. Segundo Souza et al. (1995), esta superestimativa deve-se ao fato de que este método não considera especificamente os sistemas de manejo do solo que normalmente são

empregados em áreas agrícolas.

Tabela 5.3. Escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) observados à campo, estimados pelo método CN e ajustados com valores propostos de CN, em solo com e sem palha na superfície e em diferentes intensidades de chuva. Santa Maria, RS, 2014.

	Com palha na superfície do solo			Sem palha na superfície do solo		
	Intensidade da chuva					
	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹	35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹
Valores observados						
E_t (mm)	0,00	7,27	40,49	5,20	48,96	114,26
% E	0,00	5,13	19,25	7,10	34,77	54,46
Valores estimados*						
	CN = 65,8			CN = 68,6		
	NSE=-16,1			NSE=-2,58		
	NSE=-0,30			NSE=0,65		
	NSE=0,75					
E_t (mm)	10,82	52,54	106,80	13,41	58,50	115,09
% E	15,46	37,53	50,86	19,15	41,78	54,81
Valores ajustados**						
	CN = 44,0	CN = 39,0	CN = 42,5	CN = 61,0	CN = 64,5	CN = 68,5
	NSE=0,47			NSE=0,66		
	NSE=0,37			NSE=0,83		
	NSE=0,90					
E_t (mm)	0,09	8,01	42,46	7,04	49,85	114,80
% E	0,12	5,72	20,22	10,06	35,60	54,67

*Valor de Curva Número recomendado pelo Método; **Valor de Curva Número proposto neste estudo.

No sentido de melhorar a estimativa do escoamento pelo método CN foram proposto novos valores de CN apresentados na tabela 5.3. Comparando os resultados de E_t e da % E estimados e ajustados pelo método CN, verifica-se para a intensidade de chuva de 35 mm h⁻¹ (solo com palha na superfície) (Tabela 5.2) que como não ocorreu escoamento à campo, houve uma superestimativa dos valores de E_t e % E de 10,82 mm e 15,46%, respectivamente. Quando estimados com valores propostos de CN, essa superestimativa do E_t e % E foi reduzida para 0,09 mm e 0,12 %, respectivamente.

Para a mesma intensidade de chuva, mas no solo sem palha na superfície, os valores simulados e ajustados pelo método CN superestimaram os valores de E_t em 13,41 e 7,04 mm, respectivamente, na declividade do terreno de 1% em todos os momentos do ciclo da cultura do milho avaliados (1 a 4). A mesma situação é observada para as declividades do terreno de 5 e 10% nos momentos 1 e 2 da cultura, visto que, não ocorreu escoamento superficial na aplicação da chuva a campo (Tabela 5.2).

Para a intensidade de chuva de 70 mm h^{-1} , no solo com palha na superfície, como não ocorreu escoamento superficial na aplicação da chuva a campo na declividade de 1% nos momentos 1 a 3 e, nas declividades de 5 e 10% nos momentos 1 e 2 (Tabela 5.2), os valores simulados e ajustados pelo método CN (Tabela 5.3) superestimaram os valores de E_t em 52,54 e 8,01 mm, respectivamente. Nas demais situações, o valor ajustado representou os valores de E_t com uma subestimativa de até 4,74 mm (declividade 5% e momento 3) e uma superestimativa de até 13,49 mm (declividade 10% e momento 4). Na mesma intensidade de chuva, mas no solo sem palha na superfície, houve escoamento superficial em todas as situações de campo (Tabela 5.2), variando de 20,47 mm (declividade de 5% e momento 1) a 72,20 mm (declividade de 1% e momento 4), com um valor médio para todas as situações avaliadas de 48,96 mm, sendo este, muito similar ao valor ajustado de E_t pelo método CN de 49,85 mm (Tabela 5.3).

Na intensidade de chuva de 105 mm h^{-1} , houve escoamento superficial em todas as situações de campo (Tabela 5.2), sendo que, no solo com palha na superfície, este variou de 7,12 mm (declividade de 1% e momento 1) a 71,43 mm (declividade de 10% e momento 4). No solo sem palha na superfície, o E_t variou de 54,37 mm (declividade de 1% e momento 1) a 142,56 mm (declividade de 10% e momento 4). O valor médio observado à campo para todas as situações avaliadas foi de 40,49 e 114,26 mm, respectivamente para o solo com e sem palha na superfície, sendo estes, muito similares aos valores ajustados de E_t pelo método CN de 42,46 e 114,80 mm, para o solo com e sem palha na superfície, respectivamente.

A melhoria na qualidade da estimativa das variáveis analisadas (E_t e % E) quando o método CN é ajustado, também, pode ser observada na tabela 5.4, em que são apresentados os indicadores estatísticos comparando os valores de E_t e da % E estimados e ajustados pelo método CN com os valores observados. Nessa análise, consideraram-se os valores médios de escoamento (E_t e da %E) obtidos para as diferentes intensidades de chuva (Tabela 5.3), para a condição de solo com e sem palha na superfície.

A tendência de superestimativa do E_t e da %E pelo método CN verificada na tabela 5.3 com os valores médios de escoamento e, observada na tabela 5.4 em função dos valores positivos de ME e valores de b superiores a 1, também, pode ser observada na figura 5.1 pelo padrão do escoamento superficial ao longo do tempo de aplicação da chuva.

Tabela 5.4. Indicadores estatísticos comparando os valores de escoamento total (E_t) e porcentagem de escoamento (% E) estimados e ajustados pelo método CN com os valores observados a campo. Santa Maria, RS, 2014.

	Com palha na superfície do solo				Sem palha na superfície do solo			
	b	R ²	RMSE	ME	b	R ²	RMSE	ME
E_t (mm)								
CN	2,78	0,92	46,67	40,8	1,04	1,00	7,28	6,19
CN ajustada	1,05	1,00	1,22	0,93	1,01	1,00	1,22	1,09
% E								
CN	2,95	0,84	27,62	26,49	1,08	1,00	8,05	6,47
CN ajustada	1,05	1,00	0,66	0,56	1,01	1,00	1,78	1,33

Onde: b = coeficiente angular; R² = coeficiente de determinação; RMSE = raiz quadrada do erro médio ao quadrado, expresso na unidade que a variável foi medida; ME = erro médio, expresso na unidade que a variável foi medida.

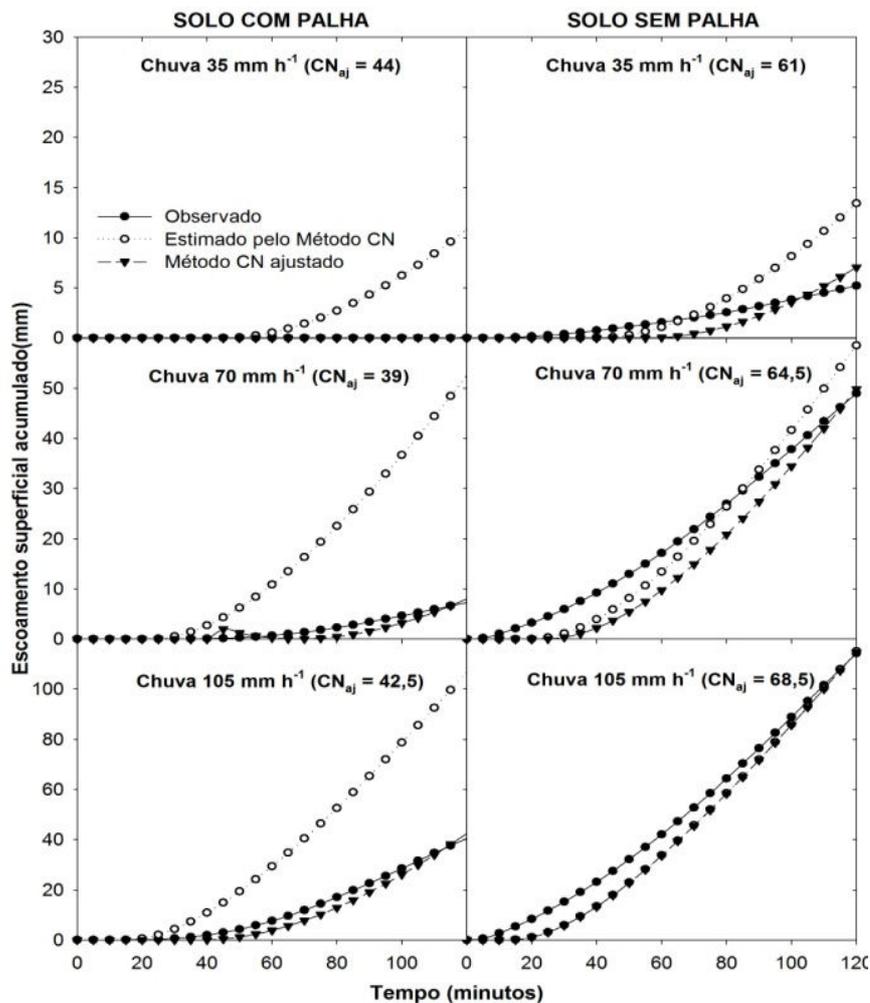


Figura 5.1 - Escoamento superficial observado à campo, estimado pelo método CN e obtido após ajuste do método CN (CN_{aj}: valor de CN ajustado, proposto neste estudo). Santa Maria, RS, 2014.

Os valores de b e R^2 próximos a 1 e os menores valores de erro (RMSE e ME) (Tabela 5.4), demonstram que a estimativa do E_t e da % E pelo Método CN é melhor para o solo sem palha na superfície, o que também pode ser visualizado na figura 5.2. Todavia, existe uma melhoria significativa destes indicadores estatísticos quando os valores de CN são ajustados para este conjunto de dados, com uma redução nos valores de RMSE de 6,05 mm e 6,27% e de ME de 5,10 mm e 5,14%, para a E_t e % E, respectivamente.

Para o solo com palha na superfície, verificou-se elevada superestimativa do E_t e da % E pelo Método CN (Tabelas 5.3 e 5.4 e Figura 5.1), evidenciada pelos elevados valores de b (2,78 e 2,95) e de ME (40,8 e 26,49 mm) (Tabela 5.4). Neste caso, o ajuste dos valores de CN propiciaram uma melhoria acentuada na qualidade da estimativa das variáveis analisadas, apresentada na figura 5.1 e, verificada com os valores de b e de R^2 próximos a 1 e com redução dos erros, sendo que, a superestimativa dos valores ajustados de E_t e % E foi de apenas 0,93 mm e 0,56%, respectivamente (Tabela 5.4).

Com isso, evidencia-se a importância do ajuste do método CN para estimativa do escoamento superficial em área agrícolas, adequando o método às condições de cobertura do solo, garantindo uma maior precisão na determinação do escoamento superficial e, em consequência, da chuva efetiva, melhorando a eficiência do uso da água de irrigação e do consumo de energia, contribuindo para a conservação dos recursos naturais.

CONCLUSÕES

Os maiores valores de escoamento superficial (68,13% do volume da chuva) foram observados no momento 4 do ciclo da cultura do milho (100% de cobertura do solo), para o solo sem palha na superfície, em acentuada declividade do terreno (10%) e intensidade de chuva (105 mm h^{-1}).

O método CN superestimou o escoamento superficial para as diferentes intensidades de chuva (35, 70 e 105 mm h^{-1}), chegando a 32,4% no solo com palha na superfície e 12% no solo sem palha.

Com valores ajustados de CN de 44, 39 e 42,5 para o solo com palha na superfície e, de 61, 64,5 e 68,5 para o solo sem palha, respectivamente para as

intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, o método CN estimou satisfatoriamente o escoamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do Número de Curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Revista Irriga**, Edição Especial, p. 264 - 279, 2012.

BANASIK, K., WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. **2nd Joint Federal Interagency Conference**, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; FABIAN, E. L.; PEGORARO, R.; ZAVASCHI, E.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háptico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243 - 250, 2008.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I. & ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 31, p.781-792, 2007.

CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774- 3789, 2011.

CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, n. 98, p. 1020 - 1026, 2011.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S.; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2002.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 685-690, 2004.

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.

DELAUNE, P.B.; SIJ, J.W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.32–35, 2012.

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENGEL, L. F.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; COGO, N. P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. **Scientia Agricola Journal**, v. 64, n. 2, p. 187 - 193, 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n. 6, p. 1039 - 1042, 2011.

HUANG, M.; GALLICHAND, J. 2; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, 20, 579–589, 2006.

HUANG, J.; ZHAO, X.; WU, P. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events. **Journal of Soil and Water Conservation**. July/August vol. 68 no. 4 283-295, 2013.

JACOBS, J. H., SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

LIMA, H. M.; VARGAS, H. CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147 - 155, 2003.

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

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DE DAVID, G.; SANTA, C. D. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1308 - 1315, 2007.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P.; RANVIR SINGH. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 301 - 322, 2006.

MISHRA, S. K. AND SINGH, V. P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, **The Netherlands**, ISBN 1-4020-1132-6, 2003.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524–534, 2011.

NRCS (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). **National Engineering Handbook**, Part 630 Hydrology, U.S. Department of Agriculture, 2009.

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

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 140 - 147, 2010.

OLIVEIRA Z, B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A.E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Revista Irriga**, v. 18, n. 3, p. 415 - 425, 2013.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261-268, 2006.

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

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2008. 88p.

RODRIGUES, L. R.; SILVA, P. R. F (org.). **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2011/2012 e 2012/2013**. Porto Alegre: Fepagro, 2011.

SCS-USDA (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. National Engineering Handbook, USDA, 1972.

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

SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S. 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 - 1230, 2001.

SOUZA, J. L, LOMBARDI NETO, F, TUBELIS, A. Estimativa e análise do escoamento superficial em solo descoberto e cultivado com a sucessão soja e trigo, sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 77-84, 1995.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R., GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G., PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, n.1, 2009.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388-403, 2008.

WILKS, D. S. Forecast verification. In: Statistical methods in the atmospheric sciences. v.1. Cornell University, San Diego, United States of America, p. 255 - 336, 1995.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; SANTOS, M. R. Efeito da aplicação sucessiva de precipitações pluviiais com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 377 - 388, 2012.

ARTIGO 3: MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL A PARTIR DA COBERTURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO, DA DECLIVIDADE DO TERRENO E DO VOLUME DE CHUVA

RESUMO: A estimativa do escoamento superficial é de fundamental importância para a determinação da chuva efetiva. Essa estimativa normalmente é realizada pelo método Curva Número (CN) e, outra maneira de realizar essa estimativa é através de equações multivariadas. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo modelar o escoamento superficial a partir da cobertura da superfície do solo, da declividade do terreno e do volume da chuva, utilizando equações multivariadas e, comparar com os valores estimados pelo CN. Foram realizados dois experimentos de campo, com as culturas do feijão e milho, em que foram aplicadas diferentes intensidades de chuvas simuladas (35, 70 e 105 mm h⁻¹), em diferentes momentos do ciclo das culturas (cobertura do solo de 0, 28, 63 e 100% pelo dossel do feijão; 0, 30, 72 e 100% pelo dossel do milho) e diferentes declividades do terreno (1, 5 e 10%), em solo sem e com (5 Mg ha⁻¹) palha de aveia preta na superfície. A partir do conjunto de dados gerado, com 432 observações, foram realizadas análises de regressão linear múltiplas, usando a opção “stepwise” do SAS, para a estimativa do escoamento superficial. Para a validação das equações geradas, utilizou-se um conjunto de dados com 216 observações, do estudo publicado por Oliveira et al. (2013) conduzido no mesmo local. O escoamento superficial deste conjunto de dados também foi estimado pelo método CN. A verificação das estimativas foi realizada por meio de indicadores estatísticos como o R², o erro médio (ME) e a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE). Foram geradas quatro equações multivariadas, sendo a Equação 2, cujos parâmetros de entrada são o volume de chuva e quantidade de palha na superfície do solo, a que apresentou o melhor ajuste do escoamento superficial do conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem. O método CN, superestimou o escoamento superficial em 17 mm. Deste modo, a equação multivariada proposta apresentou resultados similares aos da metodologia padrão (método CN). No entanto, deve-se considerar que ambas as metodologias avaliadas incorrem em erros na estimativa do escoamento superficial, o que deve ser levado em consideração para a determinação da chuva efetiva.

Palavras-chave: Método Curva Número; equações multivariadas, chuva efetiva.

SURFACE RUNOFF MODELING FROM THE COVERAGE OF SOIL SURFACE, LAND SLOPE AND RAIN VOLUME

ABSTRACT: The estimation of runoff is of fundamental importance for the determination of effective rainfall. This estimate is usually performed by Curve Number (CN) method, and another way to accomplish this is estimating by multivariate equations. Thus, the present study has the objective to model the runoff from the roof surface soil, land slope and volume of rain, using multivariate equations and compare with the values estimated by CN method. Two field experiments were conducted with black beans and maize crops, with different intensities of simulated rainfall (35, 70 and 105 mm h⁻¹) at different times of the crop cycle (soil cover of 0, 28, 63 and 100% by the canopy of beans; 0, 30, 72 and 100% by the canopy of maize) and different land slope (1, 5 and 10%) in soil without and with (5 Mg ha⁻¹) straw on the surface. From a data set generated with 432 observations, multiple linear regression analyzes were performed using the "stepwise" option of SAS for the estimation of runoff. To validate the generated equations, we used a dataset with 216 observations in the study published by Oliveira et al. (2013) conducted at the same location. Runoff of this dataset was also estimated by the CN method. The verification of the estimates was performed using statistical indicators such as R², the mean error (ME) and the square root of the mean squared error (RMSE). Four multivariate equations were generated, with Equation 2, whose input parameters are the volume of rain and amount of straw on the soil surface, the one with the best fit of runoff data set different from the one you originated. The CN method overestimated the runoff of 17 mm. Thus, the multivariate equation proposed showed similar results to the standard method (CN method). However, one must consider both methodologies evaluated incur in errors in the estimation of runoff, which must be taken into account in determining the effective rainfall.

Keywords: Curve Number method, multivariate equations, effective rainfall.

INTRODUÇÃO

A irrigação é uma técnica utilizada para minimizar as perdas na produção de cultivos agrícolas por deficiência hídrica. Entretanto, para uma produção sustentável,

a mesma deve ser manejada para evitar desperdícios de água e aumentar a eficiência deste recurso hídrico. O manejo adequado da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto.

Em regiões em que a irrigação é suplementar à chuva, como é o caso do Estado do Rio Grande do Sul, a estimativa do consumo de água das plantas ainda apresenta muitas incertezas, especialmente decorrentes da aleatoriedade das condições meteorológicas e de manejo do solo. Neste caso, uma das maiores complexidades do manejo da irrigação é a determinação da chuva efetiva, ou seja, a parcela da chuva total que será aproveitável pela cultura, conceituada como a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas, como escoamento superficial, percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008).

Para isso, a determinação do escoamento superficial é muito importante. No entanto, a sua determinação em nível de campo é trabalhosa, pois o mesmo é influenciado por vários fatores, como as características da chuva, os diferentes tipos de manejo de solo e cultura, a cobertura do solo, a declividade do terreno, entre outros (PANACHUKI et al., 2006; BERTOL et al., 2007; ENGEL et al., 2007; BERTOL et al., 2008; PRUSKI et al., 2008; SPOHR et al., 2009; BANASIK, K.; WOODWARD, D., 2010; CAO et al., 2011; CARLESSO et al., 2011; MUÑOZ-ROBLES et al., 2011; PANACHUKI et al., 2011).

Em relação aos fatores que afetam o escoamento superficial, a presença de palha na superfície do solo causa redução na velocidade do escoamento superficial e elevação da altura da lâmina do escoamento (CASSOL et al., 2004), resultando em menores perdas de solo e água (PANACHUKI et al., 2011). Em contrapartida, as perdas de solo e de água aumentam com intensidades de chuva mais elevadas (PANACHUKI et al., 2006) que causam redução no tempo de início do escoamento, independente das condições da superfície do solo (CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013). Assim, quanto mais acentuada a declividade do terreno maior será o volume de escoamento superficial (OLIVEIRA et al., 2013) e, conseqüentemente, maiores os danos devido à erosão hídrica (OLIVEIRA et al., 2010).

Para a estimativa do escoamento superficial uma das metodologias mundialmente utilizadas é o método CN, proposto pelo Serviço de Conservação do

Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (SCS-USDA, 1972; MISHRA et al., 2006; JACOBS; SRINIVASAN, 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; HUANG et al. 2013). Todavia, estudos desenvolvidos por Carlesso et al. (2011) indicam uma superestimativa do escoamento superficial em 34% com a utilização dessa metodologia. Razão pela qual, o Método CN tem sido ajustado para as diferentes condições da superfície do solo, tanto em relação ao tipo de vegetação e cobertura do solo quanto à declividade do terreno (ARAÚJO NETO et al., 2012; JACOBS; SRINIVASAN, 2005; HUANG et al., 2006; EBRAHIMIAN et al., 2012; DESHMUKH. et al., 2013).

Outra forma de estimativa do escoamento superficial é a utilização de regressões lineares múltiplas, desenvolvendo equações a partir de variáveis preditoras do escoamento superficial. Estas equações permitem estimar variáveis de difícil obtenção por meio de outras que podem ser mais facilmente obtidas (PACHEPSKY et al., 2006; NASTA et al., 2009) e são bastante utilizadas para a estimativa de propriedades hidráulicas do solo (TOMASELLA et al., 2000; SANTRA; SANKAR, 2008; MICHELON et al., 2010).

Na literatura, são poucos os estudos englobando o uso de equações multivariadas para a estimativa do escoamento, Carlesso et al. (2011) utilizou equações multivariadas para estimar variáveis do modelo de Smith modificado. Os autores observaram que, a estimativa da taxa constante de escoamento superficial, através das equações contendo as variáveis intensidade da chuva, declividade do terreno e porosidade total do solo foi satisfatória para os solos estudados. Em estudo similar para solos do Uruguai, Spohr et al. (2009), obtiveram resultados satisfatórios para a estimativa da taxa constante de escoamento superficial, realizada por meio das equações multivariadas contendo as variáveis intensidade da chuva e fração de argila e areia. Dalla Santa (2010), utilizando análise de regressão linear múltiplas para modelar a taxa constante de escoamento superficial e o tempo de início do escoamento, observou que as variáveis preditivas são as relacionadas à chuva (intensidade, duração e volume) e a umidade do solo antecedente as chuvas.

Dessa forma, o presente estudo tem com objetivo modelar do escoamento superficial a partir da cobertura da superfície do solo, da declividade do terreno e do volume chuva, utilizando equações multivariadas e, comparar com os valores estimados pelo método CN.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de campo foi realizado em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria-RS, situada em Latitude 29°41'24"S, Longitude 53°48'42"W e altitude de 105 metros. O clima da região é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

Experimentos foram instalados nos anos agrícolas de 2010/11 e 2011/12 com as culturas do feijão e do milho, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições. Os tratamentos consistiram de quatro momentos de aplicação de chuvas simuladas durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, definidos como momentos 1, 2, 3 e 4, os quais correspondem para a cultura do feijão uma cobertura de 0, 28, 63 e 100% da superfície do solo pelo dossel vegetativo e, para a cultura do milho 0, 30, 72 e 100% de cobertura da superfície do solo pelo dossel vegetativo, respectivamente.

A cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas foi determinada através do método das interseções ou do ponto quadrado, com auxílio de um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m com linhas fixadas a cada 0,05 m em todos os lados, formando uma grade de 100 pontos nos locais de intersecção das linhas. As avaliações foram realizadas com auxílio de imagens digitais, contabilizando-se as intersecções que se sobrepunham ao dossel das culturas.

Os experimentos foram conduzidos em solo sem e com palha de aveia preta na superfície do solo (5 Mg MS ha^{-1}), em três declividades do terreno (1, 5 e 10%) e três intensidades de chuva simulada ($35, 70 \text{ e } 105 \text{ mm h}^{-1}$).

A palha utilizada foi oriunda de plantas de aveia preta, que foram previamente dessecadas, cortadas próximo ao solo e secas ao Sol. Posteriormente, após a retirada cuidadosa da vegetação espontânea das parcelas experimentais, esta palha foi distribuída de acordo com a quantidade de massa seca desejada.

As declividades foram delimitadas de acordo com a topografia natural da área, com auxílio de um nível de mangueira, sendo que, em cada declividade foram demarcados três locais distintos para aplicação das chuvas simuladas, totalizando nove locais. Em cada local, foram instaladas seis parcelas de 1,0 x 1,0 metros,

totalizando 54, delimitadas com chapas metálicas cravadas no solo e contendo na parte inferior uma calha, para a coleta da água de escoamento superficial, conforme ilustrado na figura 4.1.

As chuvas simuladas foram aplicadas por um simulador estacionário com seis aspersores oscilantes desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA-ARS, EUA (NORTON; BROWN, 1992), instalado a 2,45 metros acima da superfície do solo, com pressão de saída da água nos aspersores mantida em 41,4 KPa (6,0 psi ou 4,22 mca). A intensidade da chuva foi aferida em cada avaliação através de pluviômetros instalados na superfície do solo, ao lado das parcelas experimentais. Todas as chuvas simuladas foram aplicadas em condições de umidade do solo muito semelhantes.

A semeadura da cultura do feijão foi realizada em 18 de janeiro de 2011, em sentido oposto à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se a cultivar IPR Tiziu (grupo preto, hábito de crescimento indeterminado), com espaçamento entre linhas de 0,45 m e população de 8,5 plantas por metro linear ($190.000 \text{ plantas ha}^{-1}$). Os tratamentos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações da Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão (CEPEF, 2007).

A semeadura da cultura do milho foi realizada em 09 de janeiro de 2012, em sentido oposto à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se o híbrido P1630H, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e população de $70.000 \text{ plantas ha}^{-1}$. Os tratamentos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações de Rodrigues; Silva (2011).

O início do escoamento superficial foi considerado quando a superfície do solo da parcela apresentava-se encharcada e um filete contínuo de água começava a escoar na calha coletora. Uma vez iniciado o escoamento, realizava-se a coleta dos volumes de água escoados em intervalos de cinco minutos até 120 minutos (2 horas) para cada intensidade de chuva simulada. O volume de escoamento total foi determinado pelo somatório dos volumes escoados até 120 minutos de chuva.

Após a realização das avaliações de chuvas simuladas, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e deformada para caracterização físico-hídrica, nas camadas de 0 a 0,05; 0,05 a 0,15; 0,15 a 0,25 e, 0,25 a 0,55 m de

profundidade do solo, sendo todas as análises realizadas no Laboratório de Análises Físicas de Solo do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria, cujos resultados estão apresentados na tabela 1. Os resultados da caracterização físico-hídrica do solo da área experimental após o ciclo da cultura do feijão estão apresentados na tabela 4.1 e após o ciclo da cultura do milho na tabela 5.1.

O solo pertence à classe textural franco e apresenta densidade em todas as camadas avaliadas menor que a considerada crítica para solos nesta faixa de argila, que é de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, bem como, apresenta valores de macroporosidade acima de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, valor crítico ao desenvolvimento das raízes da maioria das culturas (MICHELON et al., 2007).

A partir de um conjunto de dados gerado, com 432 observações, foram realizadas análises de regressão linear múltiplas para a estimativa do escoamento total (variável dependente). As variáveis preditivas (independentes) utilizadas foram: quantidade de chuva (mm), declividade do terreno (1, 5 e 10%), palha na superfície do solo (0 e 5 Mg ha^{-1}) e cobertura do solo pelo dossel (0, 28, 63 e 100% feijão; 0, 30, 72 e 100% milho), foram incluídas no modelo usando a opção “stepwise” do SAS, em nível de 5% de significância. Para o ingresso no modelo as intensidades de chuvas de 35, 70 e 105 mm h^{-1} , foram transformadas em volume de chuva para o tempo de 120 minutos, correspondendo a 70, 140 e 210 mm.

Para a validação da equação gerada, utilizou-se um conjunto de dados com 216 observações, do estudo publicado por Oliveira et al. (2013) conduzido no mesmo local, avaliando o escoamento superficial em solo com diferentes quantidade de palha na superfície (0, 2,5 e 5 Mg ha^{-1} de MS de aveia preta), em quatro declividades do terreno (0, 2,5, 5 e 8%) e três intensidades de chuvas simuladas (30, 80 e 120 mm h^{-1}).

Os valores de escoamento obtidos por Oliveira et al. (2013), também, foram estimados pelo método CN seguindo metodologia descrita em SCS-USDA (1972); SOUZA et al. (1995); MISHRA et al. (2006) e PRUSKI et al. (2008).

A verificação da estimativa do escoamento pela equação multivariada e pelo método CN foi realizada utilizando os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular (b), o erro médio (ME) (Equação 1) e a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) (Equação 2).

O R^2 é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear em relação aos

valores observados, variando entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, ou seja, quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra. O valor de "b" mais próximo de 1, indica que o modelo não apresenta uma tendência de superestimativa ou subestimativa dos dados. O ME é uma variável que indica a direção média dos desvios de um conjunto de dados estimados a partir de um conjunto de valores observados (Equação 5.1). Este valor indica a tendência, se o modelo está superestimando (ME positivo) ou subestimando (ME negativo). O RMSE (Equação 5.2) dá a medida do erro médio que está sendo cometido (WILKS, 1995).

Para avaliar a correlação entre as variáveis utilizadas para gerar as equações e o escoamento superficial utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, o qual indica o grau de relação existente entre as variáveis (chuva, declividade, palha e fator de cobertura) e o escoamento superficial, descrevendo a interdependência entre as variáveis (MICHELON, 2010). Deste modo, quanto maior o coeficiente de correlação de Pearson, maior é a influência de determinada variável no escoamento superficial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 6.1 é apresentada a correlação entre as variáveis utilizadas para gerar as equações e o escoamento superficial e a amplitude das variáveis utilizadas para gerar e validar as equações.

Observa-se uma similaridade entre os conjuntos de dados utilizados. Ressalta-se que a variável fator de cobertura foi utilizada somente na geração das equações. A amplitude do escoamento é maior no conjunto de dados utilizado para gerar as equações, assim como, o volume de escoamento se aproximou mais do volume de chuva aplicado, indicando maiores perdas de água por escoamento superficial. Possivelmente, em função do volume de chuva que foi maior na execução deste trabalho, tendo em vista ao tempo de aplicação das chuvas que foi padrão de 120 minutos, enquanto que no trabalho de Oliveira et al. (2013) esse tempo foi variável de 35 a 120 minutos. Huang et al. (2013) observaram uma relação linear positiva entre a intensidade média do escoamento e a intensidade da chuva e,

que a intensidade do escoamento aumentou com o aumento da duração da precipitação em relação logarítmica.

Tabela 6.1 Valores máximos, mínimos, médios, desvio padrão e coeficiente de correlação das variáveis utilizadas para gerar e validar as equações multivariadas para a estimativa do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2014.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvp	r
Dados utilizados para gerar as equações					
Declividade (%)	10,00	1,00	5,33	3,68	0,13741
Palha (Mg ha ⁻¹)	5,00	0,00	2,50	2,50	-0,42352
Fator de cobertura (%)	100,00	0,00	47,75	37,56	0,11229
Chuva (mm)	215,36	64,13	141,85	55,69	0,72243
Escoamento total (mm)	174,92	0,00	52,00	47,12	
Dados utilizados para validar as equações					
Declividade (%)	8,00	0,00	3,87	2,96	
Palha (Mg ha ⁻¹)	5,00	0,00	2,50	2,04	
Fator de cobertura (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	
Chuva (mm)	185,19	19,47	84,04	41,59	
Escoamento total (mm)	115,62	0,00	41,00	30,73	

Onde: Desvp = desvio padrão; r = coeficiente de correlação de Pearson.

Verifica-se que a chuva ($r = 0,72243$) seguida da palha ($r = -0,42352$) são as variáveis com maior correlação com o escoamento superficial. A correlação positiva entre chuva e escoamento superficial, demonstra que as perdas de água aumentam com intensidades de chuva mais elevadas (PANACHUKI et al., 2006) e que causam redução no tempo de início do escoamento, independente das condições da superfície do solo (CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013). Assim como, a correção negativa entre o escoamento superficial e a palha, traduz os efeitos benéficos da cobertura do solo por resíduos na redução das perdas de água por escoamento superficial (CASSOL et al., 2004; PANACHUKI et al., 2011; DELAUNE; SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

A correlação entre a declividade do terreno ($r = 0,13741$) e o fator cobertura pelo dossel ($r = 0,11229$) com o escoamento superficial, embora significativa, foi pequena comparada à observada para as variáveis chuva e palha. A correlação positiva indica que a medida que aumenta a declividade e a cobertura do solo pelo dossel aumentam as perdas de água por escoamento superficial. O efeito da declividade é o esperado, quanto mais acentuada a declividade do terreno maior

será o volume de escoamento superficial, conforme levantado por diversos autores (OLIVEIRA et al., 2010; CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013, HUANG et al., 2006). Todavia, o efeito positivo da cobertura do solo pelo dossel das plantas no incremento do escoamento superficial contraria a literatura no que se refere à capacidade da cobertura do solo pelo dossel em amenizar o escoamento superficial (MELLO et al., 2003; ENGEL et al., 2007; HUANG et al., 2013).

As quatro equações geradas pela opção “stepwise” para a estimativa do escoamento superficial são apresentadas na tabela 6.2. A variável chuva, que apresentou a maior correlação com o escoamento superficial, foi a que apresentou maior contribuição no R^2 (0,5219) para a composição das equações, seguida da variável palha com um R^2 parcial de 0,179. A capacidade preditiva das equações, avaliada para um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem, é apresentada na tabela 6.3.

Tabela 6.2 Equações multivariadas para a estimativa do escoamento superficial. Santa Maria, RS, 2014.

	Equação 1		Equação 2		Equação 3		Equação 4	
	Coef.	R^2 parc.						
Intersecção	-34,696		-14,763		-23,869		-23,869	
Chuva	0,611	0,522	0,611	0,522	0,611	0,522	0,611	0,522
Palha			-7,973	0,179	-7,973	0,179	-7,973	0,179
Declividade					1,720	0,018	1,720	0,018
FC							0,131	0,011
R^2	0,5219		0,7013		0,7194		0,7303	

Onde: coef.= coeficiente; R^2 parc.= contribuição de cada variável para o R^2 ; chuva, expressa em mm; palha, expressa em $Mg\ ha^{-1}$; declividade, expressa em %; FC = fator de cobertura do solo pelo dossel vegetativo, expresso em %.

Tabela 6.3 Indicadores estatísticos comparando os valores de escoamento observados com os valores estimados pelas equações multivariadas. Santa Maria, RS, 2014.

Indicador	Equação 1	Equação 2	Equação 3	Equação 4
b	0,50	0,57	0,54	0,42
R^2	0,52	0,70	0,72	0,73
RMSE (mm)	29,29	26,56	29,74	33,12
ME (mm)	-21,44	-18,03	-21,62	-25,39

Onde: R^2 = coeficiente de determinação; b = coeficiente angular; ME = erro médio; RMSE = raiz quadrada do erro médio ao quadrado.

Os valores negativos de ME indicam que as equações geradas subestimam significativamente o escoamento superficial, com valores variando de 18 a 25 mm. Contudo, os resultados demonstram que um maior número de variáveis de entrada na equação (Equações 3 e 4) não resulta em maior qualidade na estimativa do escoamento superficial. Visto que, a maior precisão na estimativa do escoamento superficial, menores valores de RMSE e ME e maiores valores de b e R^2 , é observada para a Equação 2, cujos parâmetros de entrada são o volume de chuva e quantidade de palha na superfície do solo.

A Figura 6.1 demonstra a tendência subestimativa do escoamento superficial pela Equação 2. A distribuição dos pontos ao longo da linha 1:1, demonstra que essa subestimativa é mais acentuada para valores de escoamento superficial superiores a 40 mm.

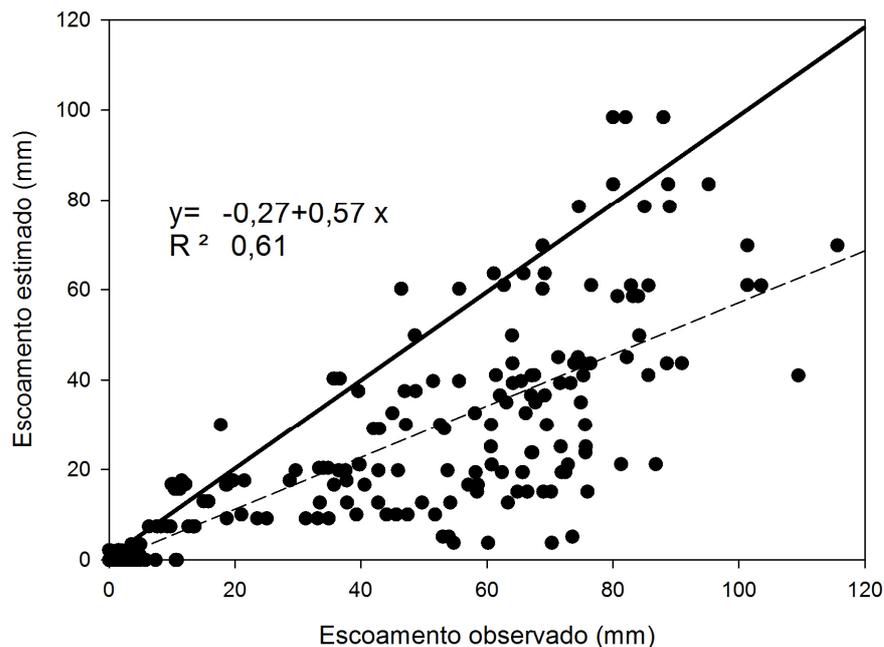


Figura 6.1 Relação 1:1 (linha cheia) e linha de tendência (linha pontilhada) para o escoamento superficial observado e estimado pela equação multivariada (Equação 2). Santa Maria, RS, 2014.

A figura 6.2 apresenta a relação 1:1 e os indicadores estatísticos (R^2 , RMSE e ME) para a estimativa do escoamento superficial gerado em dois intervalos de volume de chuva (19 a 70 mm; 71 a 185 mm) para a equação 2.

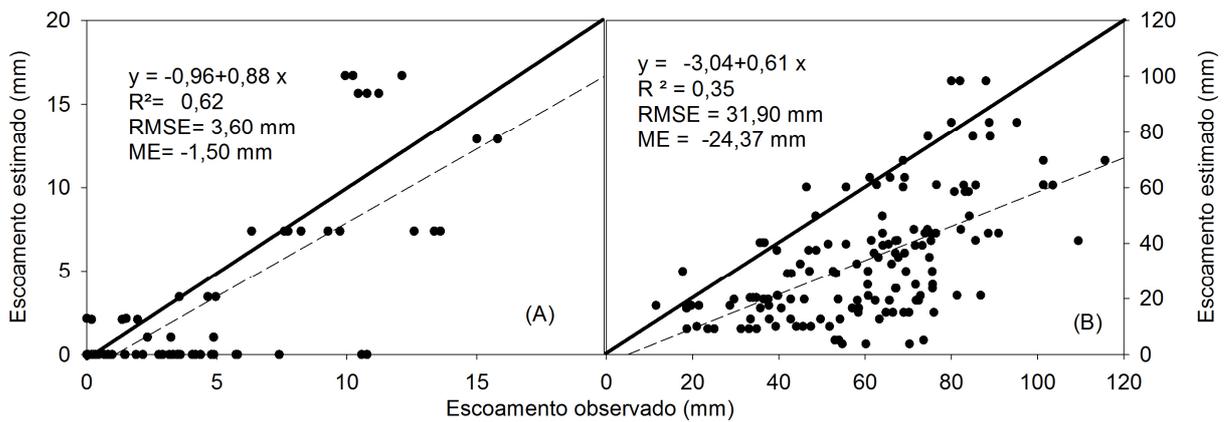


Figura 6.2 Relação 1:1 (linha cheia) e linha de tendência (linha pontilhada) para o escoamento superficial observado e estimado pela equação multivariada (Equação 2) para volumes de chuva variando de 19 a 70 mm (A) e de 71 a 185 mm (B). Santa Maria, RS, 2014.

Para volumes de chuva variando de 19 a 70 mm, o valor médio de escoamento superficial observado é de 5 mm. Considerando que a utilização da equação gera uma subestimativa de 1,5 mm, o valor de escoamento superficial estimado é 3,5 mm, ou seja, a precisão da estimativa é de 70%. Para volumes de chuva de 71 a 185 mm, o escoamento médio observado foi de 59 mm, considerando uma subestimativa de 24 mm. A estimativa do escoamento médio pela equação é de 35 mm, representando uma precisão de 59%. Estes resultados indicam que a estimativa do escoamento superficial pela Equação 2 é mais precisa em volumes menores de chuva.

Para uma análise comparativa entre a equação gerada (Equação 2) e o método padrão (Método CN), na figura 6.3 é apresentada a relação 1:1 e os indicadores estatísticos (R^2 , RMSE e ME) comparando o escoamento superficial observado com o estimado pelo Método CN.

Analisando as figuras 6.1 e 6.3, verifica-se uma distribuição mais homogênea dos pontos ao longo da linha 1:1 na figura 6.3, indicando maior ajuste entre os valores de escoamento observados com os estimados pelo método CN. No entanto, o escoamento superficial foi superestimado pelo método CN em 17,47 mm, corroborando com os resultados obtidos por Carlesso et al. (2011), Wang; Huang (2008), Zhang et al. (2004) e Gao et al. (2006), que observaram superestimava do escoamento superficial pelo método CN para diferentes solos.

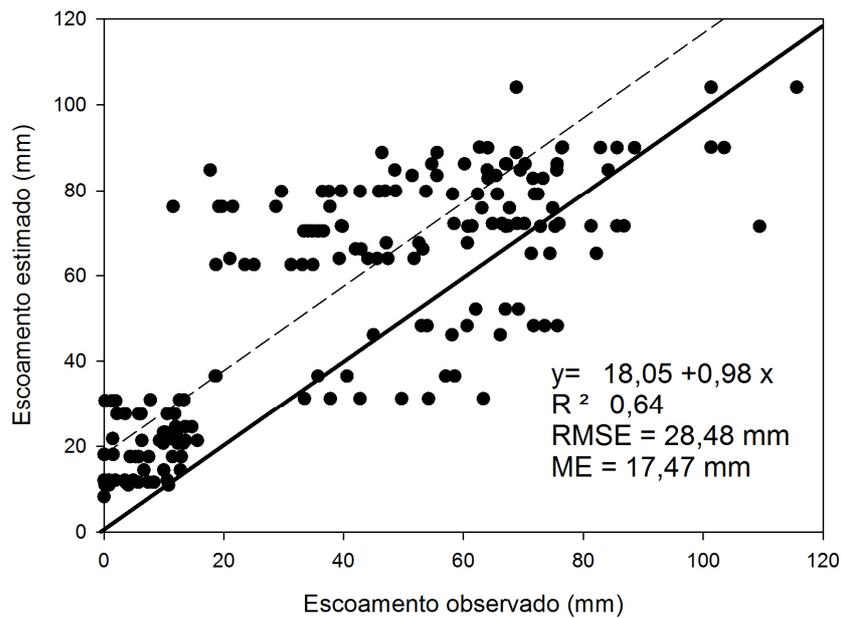


Figura 6.3 – Relação 1:1 (linha cheia) e linha de tendência (linha pontilhada) para o escoamento superficial observado e estimado pelo método CN. Santa Maria, RS, 2014.

Avaliando a precisão do método CN nos intervalos de volume de chuva de 19 a 70 mm e de 71 a 185 mm (Figura 6.4), observa-se para volumes de chuva entre 19 e 70 mm que o escoamento superficial é superestimado em 12,38 mm, resultando em um valor médio estimado de 17,38 mm, visto que o valor observado é de 5 mm. Neste caso, por apresentar menor erro médio (-1,5 mm), a equação multivariada seria mais indicada para estimativa do escoamento superficial (Figura 6.2 A).

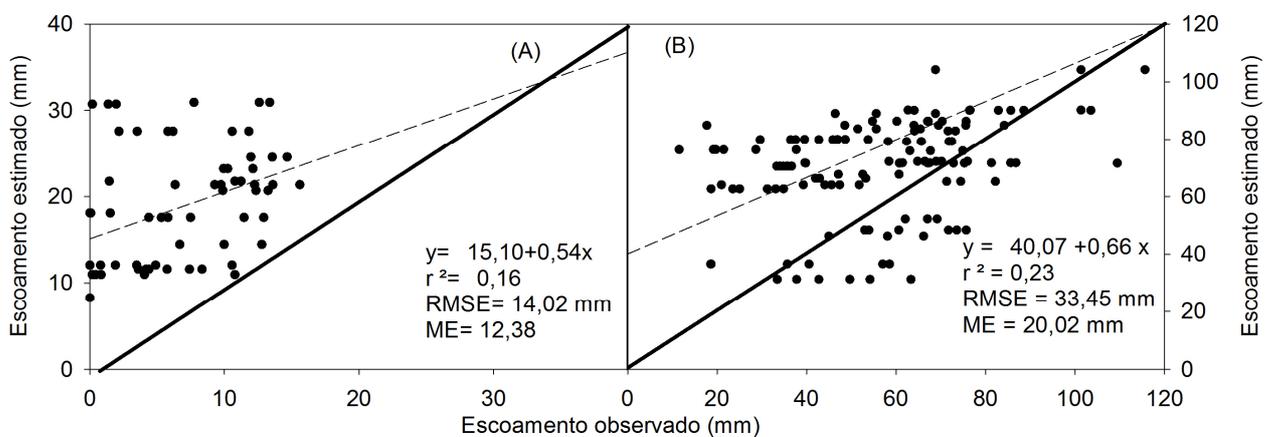


Figura 6.4 – Relação 1:1 (linha cheia) e linha de tendência (linha pontilhada) para o escoamento superficial observado e estimado pelo método CN para volumes de chuva variando de 19 a 70 mm (A) e para volume de chuvas variando de 71 a 185 mm (B). Santa Maria, RS, 2014.

Para volumes de chuva entre 71 e 185 mm, o erro é muito similar para as duas metodologias avaliadas (Figuras 6.2B e 6.4B), havendo uma superestimativa do escoamento superficial de 20 mm pelo método CN (Figura 6.3 B) e uma subestimativa de 24 mm (Figura 6.1) pela equação multivariada.

Conforme pode-se observar, a equação proposta neste estudo para a estimativa do escoamento superficial, apresentou resultados similares aos da metodologia padrão (Método CN). No entanto, deve-se considerar que ambas as metodologias avaliadas incorrem em erros na estimativa do escoamento superficial, o que deve ser levado em consideração para a determinação da chuva efetiva. Mesmo que a magnitude do erro seja muito similar para as duas metodologias, as consequências destes são diferentes. A superestimativa no escoamento superficial (método CN) resulta em menores valores de chuva efetiva, demandando irrigações mais frequentes e aumento nos custos da agricultura irrigada. A subestimativa do escoamento superficial (equação multivariada) resulta na superestimativa da chuva efetiva, implicando em irrigações mais espaçadas, o que pode levar a um déficit hídrico indesejado e comprometer a produtividade da cultura.

CONCLUSÕES

O volume de chuvas e a cobertura do solo por palha são as variáveis com maior correlação com o escoamento superficial, apresentando as maiores contribuições no R^2 para a composição das equações multivariadas.

A equação gerada com o maior número de variáveis de entrada (volume de chuvas, quantidade de palha, declividade do terreno e cobertura do solo pelo dossel), avaliada para um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem, não apresentou a maior precisão da estimativa do escoamento superficial.

Das quatro equações geradas neste estudo, a Equação 2 ($E_t = 0,611 \cdot Ch - 7,973 \cdot Pal - 14,763$, onde E_t : escoamento superficial total (mm); Ch : volume de chuva (mm) e Pal : quantidade de palha na superfície do solo ($Mg\ ha^{-1}$), foi a que apresentou a menor subestimativa (18 mm) do escoamento superficial de um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem. Maior precisão na estimativa do escoamento superficial foi observada para volumes de chuvas de 19 a 70 mm (erro médio -1,5 mm).

O método CN, considerado como padrão para a estimativa do escoamento superficial, superestimou o escoamento em 17 mm. Essa superestimativa é maior para o escoamento gerado em volumes de chuva de 19 a 70 mm (erro médio 12,38 mm).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do número de curva (CN/SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, p. 264-279, 2012.
- BANASIK, K., WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.
- BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 36, n. 1, jan.-abr., p. 24 - 33, 2005.
- BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; FABIAN, E. L.; PEGORARO, R.; ZAVASCHI, E.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háplico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243 - 250, 2008.
- BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I.; ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 781 - 792, 2007.
- CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774- 3789, 2011.
- CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, n. 98, p. 1020 - 1026, 2011.
- CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A.. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n. 7, p. 685 - 690, 2004.
- CEPEF - Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão. **Indicações técnicas para a cultura do feijão no Rio Grande do Sul 2007/08**. Pelotas, 2007. 110p.
- DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial de um solo com diferentes níveis de resíduos vegetais e declividades do terreno. 2010. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria.
- DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p.
- DELAUNE, P.B.; SIJ, J.W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.32–35, 2012.

DESHMUKH, D. S.; CHAUBE, U. C.; HAIULU, A. E.; GUDETA, D. A.; KASSA, M.T. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology**. v 492.p 89–101, 2013.

EBRAHIMIAN, M.; AINUDDIN, A.B.; SOOM, M. A. B. M.; SOOD, A. M.; NENG, L. J. Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Methods. **Journal of Environmental Studies**. Vol. 21, No. 5 1191-1202, 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENGEL, F. L.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; COGO, N. P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 2, p. 187 - 193, 2007.

GAO, Y.; ZHU, B.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. Z. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of Purple soil. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, v. 22, n. 11, p. 396–400, 2006.

HUANG, J.; ZHAO, X.; WU, P. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events. **Journal of Soil and Water Conservation**. July/August vol. 68 no. 4 283-295, 2013.

HUANG, M.; GALLICHAND, J. 2; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, 20, 579–589, 2006.

JACOBS, J. H., SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

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

MICHELON, C. J. Pedofunções para a retenção de água de solos do Rio Grande do Sul irrigados por aspersão. 2010. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DE DAVID, G.; SANTA, C. D. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1308 - 1315, 2007.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P.; RANVIR SINGH. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 301 - 322, 2006.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524–534, 2011.

NASTA, P.; KAMAI, T.; CHIRICO, G.B.; HOPMANS, J.W.; ROMANO, N. Scaling soil water retention functions using particle size distribution. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 223-234, 2009.

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

OLIVEIRA Z, B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A.E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Revista Irriga**, v. 18, n. 3, p. 415 - 425, 2013.

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob

diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 140 - 147, 2010.

PACHEPSKYA, Y.A.; RAWLSB, W.J.; LINC H.S. Hydropedology and pedotransfer functions. **Geoderma**, v.11, p.308-316, 2006.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261 - 268, 2006.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; BICCA, D. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1777 - 1786, 2011.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; DEMETRIUS,D.D. **Escoamento superficial**. Ed. UFV, 2 ed, Viçosa-MG, 2008.

RAHMAN, M.M.; ISLAM, M.O; HASANUZZAMAN, M. Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh. **World Journal of Agricultural Sciences**. v.4; p. 453-457, 2008.

RODRIGUES, L. R.; SILVA, P. R. F (org.). **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2011/2012 e 2012/2013**. Porto Alegre: Fepagro, 2011.

SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; BÔAS, M. A. V.; OLIVEIRA, L. F. C. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 210 - 213, 2000.

SANTRA, P.; SANKAR, B.D. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. **Geoderma**, v.146, .439-448, 2008.

SCS-USDA (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture). **National Engineering Handbook**, USDA, 1972.

SOUZA, J. L, LOMBARDI NETO, F, TUBELIS, A. Estimativa e análise do escoamento superficial em solo descoberto e cultivado com a sucessão soja e trigo, sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 77-84, 1995.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R., GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G., PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, n.1, 2009.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:327-338, 2000.

WANG, Y.; HUANG, M. B. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau. **Bulletin Soil Water Conservation**, v. 28, n.1, p. 54-58, 2008.

ZHANG, M. H.; WANG, X. Y.; QIN, F. L. Application of SCS model to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County. **Journal of Capital Normal University** (Natural Science Edition), v. 25, n. 1, p. 155 - 158, 2004.

WILKS, D. S. Forecast verification. In: Statistical methods in the atmospheric sciences. v.1. Cornell University, San Diego, United States of America, p. 255 - 336, 1995.

ARTIGO 4: ESTIMATIVA DA CHUVA EFETIVA PARA AS CULTURAS DO FEIJÃO E MILHO UTILIZANDO O MODELO SIMDualKc

RESUMO: Modelos de simulação de balanço hídrico do solo podem ser utilizados como ferramentas para a estimativa da chuva efetiva e da necessidade hídrica dos cultivos. Esse trabalho teve como objetivo estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo das culturas de feijão e milho, cultivadas em solo com e sem palha na superfície, utilizando o modelo SIMDualKc. Para isso, foram realizados dois experimentos de campo, com as culturas do feijão e do milho, em que foram aplicadas diferentes intensidades de chuvas simuladas (35, 70 e 105 mm h⁻¹), em diferentes momentos do ciclo das culturas (cobertura do solo de 0, 28, 63 e 100% pelo feijão; 0, 30, 72 e 100% pelo milho), em solo sem e com (5 Mg ha⁻¹) palha de aveia preta na superfície. A partir das características do solo, das condições meteorológicas, do manejo das culturas e do volume das chuvas simuladas foram realizadas simulações com o modelo SIMDualKc, estimando o volume de escoamento superficial pelo método Curva Número (CN) e da chuva efetiva (chuva total – escoamento superficial). Primeiramente utilizou-se valor de CN padrão, sugerido em tabela auxiliar do modelo (CN 75), posteriormente procedeu-se o ajuste no valor de CN baseado em indicadores estatísticos como o R², o erro médio (ME) e a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE). Os resultados demonstraram que o método CN utilizado pelo modelo SIMDualKc para estimar o escoamento superficial não considera os benefícios da palha na superfície do solo para a redução do escoamento superficial, que foi superior a 40% neste estudo, resultando na subestimativa do escoamento superficial em até 35 mm para o solo sem palha e superestimativa em até 30 mm para o solo com palha na superfície. Após os ajustes nos valores de CN em novos valores de 71 e 87 para a cultura do feijão e de 56 e 79 para a cultura do milho, para o solo com e sem palha na superfície, respectivamente, a estimativa da chuva efetiva pelo modelo SIMDualKc foi muito similar a observada a campo.

Palavras-chave: ferramentas de simulação, método Curva Número, escoamento superficial.

ESTIMATIVE OF THE EFFECTIVE RAIN FOR BLACK BEAN AND MAIZE CROPS USING THE SIMDualKc MODEL

ABSTRACT: Simulation models of soil water balance can be used as tools to estimate the effective rainfall and the crop water requirement. The objective of this study is estimate the surface runoff and effective rainfall during the crop cycle of black beans and maize grown in soil with and without straw on the surface, using SIMDualKc model. Thus, two field experiments with common black bean and maize were carried out in different simulated rainfall intensities (35, 70 and 105 mm h⁻¹) at different times of the crop cycle (soil cover of 0, 28, 63 and 100% for black beans and, 0, 30, 72 and 100% for maize) in soil without and with (5 Mg ha⁻¹) of oat straw on the surface. From the characteristics of soil, weather conditions, crop management and the volume of rainfall simulator with several simulations were performed SIMDualKc model, estimating the volume of runoff by Curve Number (CN) method and effective rainfall (total rain - runoff). First we used CN default value, suggested in the model auxiliary table (CN 75), later proceeded to adjust the amount of CN based on statistical indicators such as R², the mean error (ME) and root mean square error squared (RMSE). The results demonstrate that the CN method used by SIMDualKc model to estimate the runoff does not consider the benefits of straw on the soil surface to reduce the surface flow, that was greater than 40% in this study, resulting in underestimation of runoff to 35 mm into the soil without straw and overestimation of up to 30 mm into the soil with straw on the surface. After adjusting the values of CN of new values of 71 and 87 for the black beans crop and 56 and 79 for the maize crop for the soil with and without straw on the surface, respectively, the estimated effective rain by the model SIMDualKc was very similar to those observed in the field.

Keywords: simulation tools, Curve Number method, runoff.

INTRODUÇÃO

A chuva efetiva corresponde a parcela da chuva total que é aproveitável pela cultura, conceituada como a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas,

como escoamento superficial, percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008). A chuva efetiva é fundamental para o manejo da irrigação, especialmente em regiões em que a irrigação é suplementar à chuva, como é o caso do Estado do Rio Grande do Sul, sendo sua determinação uma das maiores complexidades do manejo da irrigação.

Para estimativa da chuva efetiva é imprescindível a determinação do escoamento superficial, o qual em nível de campo é trabalhoso e complicado, pois é influenciado por vários fatores, como as características da chuva, os diferentes tipos de manejo de solo e cultura, a cobertura do solo, a declividade do terreno, entre outros (PANACHUKI et al., 2006; BERTOL et al., 2007; ENGEL et al., 2007; BERTOL et al., 2008; PRUSKI et al., 2008; SPOHR et al., 2009; BANASIK, K.; WOODWARD, D., 2010; CAO et al., 2011; CARLESSO et al., 2011; MUÑOZ-ROBLES et al., 2011; PANACHUKI et al., 2011, OLIVEIRA et al., 2013).

As culturas de feijão e milho, juntamente com a cultura da soja, são os cultivos predominantes durante a safra de verão e safrinha em áreas irrigadas do Rio Grande do Sul (MELO, 2006) e, estudos com estas culturas para fins de manejo de irrigação são fundamentais para a correta utilização da água e preservação dos recursos naturais.

A utilização de palha na superfície do solo é amplamente difundida no Brasil, especialmente no Estado do Rio Grande do Sul, devido ao sistema agrícola de cultivo em semeadura direta (DÍAZ-ZORITA et al., 2002; FABRIZZI et al., 2005). Dentre os benefícios desse sistema e que impulsionaram sua adoção, pode citar-se a redução da evaporação do solo, aumentando a água armazenada, melhora na ciclagem de nutrientes, o controle da erosão do solo e o controle de escoamento superficial (MACHADO; SILVA, 2001; DÍAZ-ZORITA et al., 2002; FABRIZZI et al., 2005; CARLESSO et al., 2011).

O modelo SIMDualKc foi desenvolvido por ROSA et al. (2012) com o objetivo de simplificar a aplicação do cálculo do coeficiente de cultura e a evapotranspiração da cultura utilizando a abordagem Kc dual a uma série de conjunto de práticas culturais e para fornecer informações da ETc para uso em manejo da irrigação e balanços hidrológicos. O método do Kc dual (ALLEN et al., 1998; 2005) estima separadamente a transpiração diária da cultura e a evaporação do solo, através da aplicação de dois coeficientes ($Kc \text{ dual} = Kcb + Ke$), o coeficiente cultural basal (Kcb)

e o coeficiente de evaporação de água no solo (K_e). O método realiza um balanço hídrico do solo em nível de campo utilizando um intervalo de tempo diário.

Esta abordagem utilizando a metodologia do K_c dual produz estimativas da ET_c mais precisas do que a metodologia do K_c simples, principalmente em irrigações de alta frequência e de culturas de cobertura parcial do solo, bem como quando ocorrem eventos frequentes de chuvas (TOLK; HOWELL, 2001; HOWELL et al., 2004). O SIMDual K_c foi o primeiro modelo desenvolvido para estimativa da ET_c utilizando a metodologia K_c dual proposta por Allen et al. (1998, 2005). Seu primeiro teste publicado foi realizado com observações de água no solo (ROSA et al., 2012). O modelo foi testado para determinação separadamente da evaporação e transpiração em pêssigo (PAÇO et al., 2012), para considerar o efeito de cobertura ativas do solo em videiras (FANDIÑO et al., 2012), e para validar as duas fases da evaporação de água no solo (RITCHIE, 1972) para milho e trigo (ZHAO et al., 2013), e para obtenção do coeficiente de cultura basal do milho em sistema de cultivo plantio direto (MARTINS et al., 2013). Sendo conveniente testar o SIMDual K_c para determinação do escoamento superficial e chuva efetiva.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo das culturas de feijão e milho, cultivadas em solo com e sem palha na superfície, utilizando o modelo SIMDual K_c .

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de campo foi realizado em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria-RS, situada em Latitude 29°41'24"S, Longitude 53°48'42"W e altitude de 105 metros. O clima da região é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). O solo do local está classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

Experimentos foram instalados nos anos agrícolas 2010/11 e 2011/12 com as culturas do feijão e milho, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições. Os tratamentos consistiram de quatro momentos de aplicação de chuvas simuladas durante o ciclo de

desenvolvimento das culturas, definidos como momentos 1, 2, 3 e 4, os quais correspondem a uma cobertura da superfície do solo de 0, 28, 63 e 100% pelo dossel da cultura do feijão e, de 0, 30, 72 e 100% pelo dossel da cultura do milho, respectivamente.

A cobertura da superfície do solo pelo dossel das plantas foi determinada através do método das interseções ou do ponto quadrado, com auxílio de um quadro de madeira de 0,5 x 0,5 m com linhas fixadas a cada 0,05 m em todos os lados, formando uma grade de 100 pontos nos locais de intersecção das linhas. As avaliações foram realizadas com auxílio de imagens digitais, contabilizando-se as intersecções que se sobrepunham ao dossel das culturas.

Os experimentos foram conduzidos em solo sem e com (5 Mg MS ha⁻¹, 100% de cobertura da superfície do solo) palha na superfície e em três intensidades de chuva simulada (35, 70 e 105 mm h⁻¹). A palha utilizada foi oriunda de plantas de aveia preta previamente dessecadas, cortadas próximas ao solo e secas ao Sol. Após a retirada cuidadosa da vegetação espontânea das parcelas experimentais, esta palha foi distribuída de acordo com o teor de massa seca desejado.

Foram demarcados três locais com declividade do terreno de 1%, de acordo com a topografia natural da área, para aplicação das distintas intensidades de chuvas simuladas em cada local. Nestes locais foram instaladas seis parcelas de 1,0 x 1,0 metros, totalizando 18 parcelas, delimitadas com chapas metálicas cravadas no solo e contendo na parte inferior uma calha, para a coleta da água de escoamento superficial, conforme ilustrado na figura 7.1.

As chuvas simuladas foram aplicadas por um simulador estacionário com seis aspersores oscilantes desenvolvido pelo National Soil Erosion Research Lab, USDA-ARS, EUA, instalado a 2,45 metros acima da superfície do solo, com pressão de saída da água nos aspersores mantida em 41,4 KPa (6,0 psi ou 4,22 mca). A intensidade da chuva foi aferida em cada avaliação através de pluviômetros instalados na superfície do solo, ao lado das parcelas experimentais. Todas as chuvas simuladas foram aplicadas em condições de umidade do solo muito semelhantes. As chuvas simuladas tiveram duração de 120 minutos (2 h), correspondendo a volumes aplicados de aproximadamente 70, 140 e 210 mm, nas intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

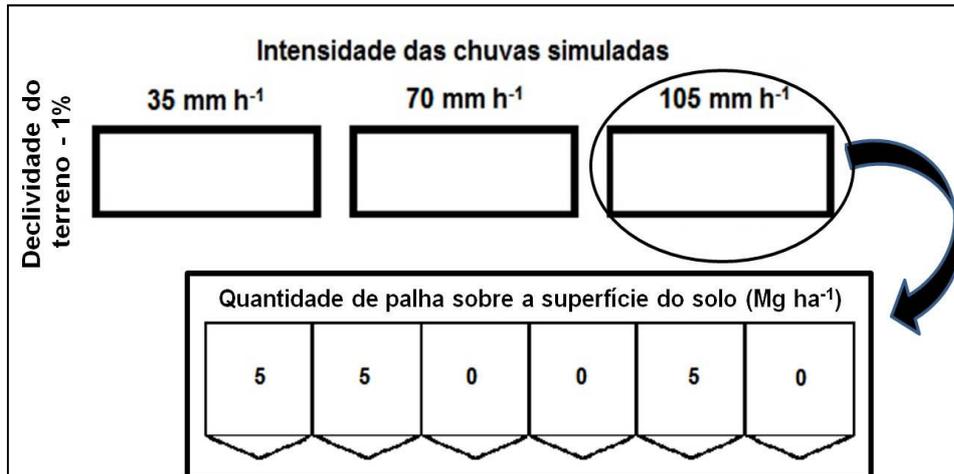


Figura 7.1. Ilustração sobre a distribuição dos tratamentos para avaliação do escoamento superficial de água do solo durante o ciclo de desenvolvimento das culturas do feijão e do milho. Santa Maria, RS, 2014.

A semeadura da cultura do feijão foi realizada em 18 de janeiro de 2011, em sentido oposto à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se a cultivar IPR Tiziu (grupo preto, hábito de crescimento indeterminado), com espaçamento entre linhas de 0,45 m, orientação Leste-Oeste e população de 8,5 plantas por metro linear (19 plantas m⁻²). Os tratos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações da Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão (CEPEF, 2007).

A semeadura da cultura do milho foi realizada em 09 de janeiro de 2012, em sentido oposto à declividade do terreno, com semeadora-adubadora tratorizada equipada com disco de corte e sulcador, utilizando-se o híbrido P1630H, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, orientação Leste-Oeste e população de 7 plantas m⁻². Os tratos culturais, como adubação, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, seguiram as recomendações de Rodrigues; Silva (2011).

Durante a aplicação das chuvas simuladas determinou-se o volume total de escoamento. O início do escoamento foi considerado quando a superfície do solo da parcela apresentava-se encharcada e um filete contínuo de água começava a escoar na calha coletora, coletava-se o volume de água escoado em intervalos de cinco minutos até os 120 minutos (tempo de duração das chuvas simuladas) para cada intensidade de chuva. O volume de escoamento total foi determinado pelo somatório dos volumes escoados durante o tempo total da chuva simulada.

Os valores de escoamento superficial obtidos nos ensaios de campo foram comparados aos estimados pelo modelo SIMDualKc, com o qual procedeu-se a estimativa da chuva efetiva. O modelo SIMDualKc considera a chuva efetiva como a diferença entre a chuva total e o escoamento superficial. Para a estimativa do escoamento superficial, o modelo utiliza o método CN (ROSA et al., 2012). Este método usa dois parâmetros: o valor de CN e a depleção de água na camada superficial (D_e). O primeiro é selecionado a partir de valores tabelados (Allen et al., 2007), dependendo do tipo de solo e vegetação, sendo depois ajustado para as condições do teor de umidade na camada superficial do solo (D_e) antecedente a precipitação. O D_e é calculado por um balanço hídrico diário na camada superficial do solo. Assim, de acordo com a correspondência entre D_e e três condições pré-estabelecidas de umidade do solo, AWC I, AWC II, e AWC III (representando condições secas, médias e úmidas, respectivamente), o valor de CN é ajustado diferenciadamente (ROSA et al., 2012). O balanço hídrico do solo na zona radicular é expresso em termos de depleção de água no solo, conforme equação 7.1, descrita por Allen et al. (1998, 2007):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (\text{Equação 7.1})$$

Onde: $D_{r,i}$ é a depleção de água na zona radicular no fim do dia i (mm), $D_{r,i-1}$ é a depleção de água na zona radicular no fim do dia $i-1$ (mm), P_i é a precipitação no dia i (mm), RO_i é o escoamento superficial no dia i (mm), I_i é a lâmina de irrigação infiltrada no solo no dia i (mm), CR_i é a ascensão capilar de água (mm), $ET_{c,i}$ é a evapotranspiração da cultura no dia i (mm), e DP_i é a perda de água por percolação profunda no dia i (mm).

A ascensão capilar (CR_i) e a percolação profunda (DP_i) foram estimadas pelo modelo SIMDualKc utilizando as equações paramétricas propostas por Liu et al. (1998, 2006), utilizando valores calibrados para o mesmo local deste estudo por Martins et al. (2013).

A caracterização física do solo foi realizada após a realização das avaliações de chuvas simuladas, sendo todas as análises realizadas no Laboratório de Análises Físicas de Solo do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. Os parâmetros relativos às

características do solo, às culturas e as condições meteorológicas necessários para a simulação no modelo SIMDualKc são apresentados na tabela 7.1, tabela 7.2 e figura 7.2, respectivamente. O manejo da irrigação (Figura 7.2) foi realizado com auxílio do Sistema Irriga® (www.sistemairriga.com.br).

Tabela 7.1 Parâmetros relacionados ao solo utilizados nas simulações com o modelo SIMDualKc. Santa Maria, RS, 2014.

Camada do solo (m)	Textura			CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	TAW* (mm)	Ze* (m)	TEW* (mm)	REW* (mm)	a _D * (mm)	b _D * (mm)
	% Arg.	% Ar.	% Sil.								
0 - 0,05	16,72	44,44	38,84	0,380	0,10						
0,05 - 0,15	16,91	40,66	42,43	0,380	0,10	130	0,15	49	12	390	-0,022
0,15 - 0,25	17,25	41,23	41,52	0,375	0,10						
0,25 - 0,55	20,73	35,35	43,92	0,390	0,19						

Onde: Arg.: Argila; Ar.: Areia; Sil.: Silte; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; TAW: total de água disponível; Ze.: Profundidade da camada evaporativa; TEW: Total de água evaporável; REW: água facilmente evaporável; a_D e b_D são parâmetros da equação de percolação proposta por Liu et al. (2006). *Valores calibrados por Martins et al. (2013).

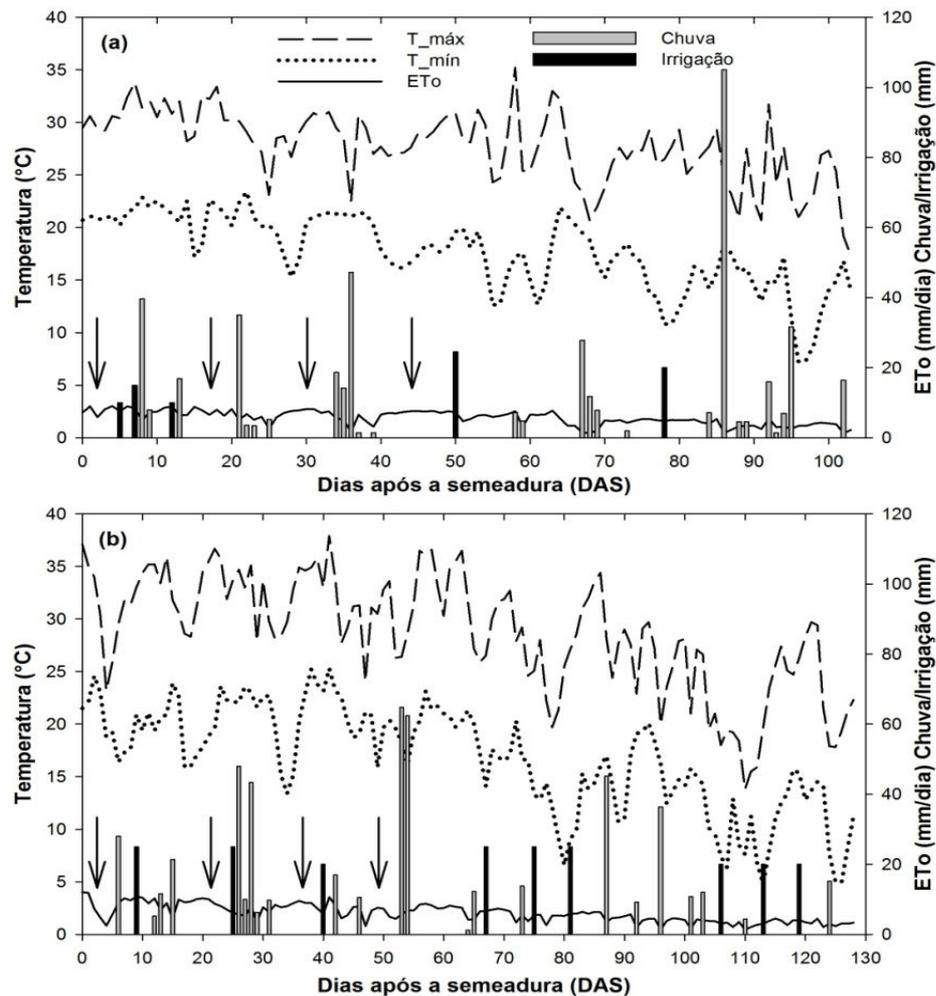


Figura 7.2 Temperaturas máxima e mínima, evapotranspiração de referência, chuvas e irrigações durante o ciclo do feijão (a) e milho (b). As setas (↓) indicam o momento de aplicação das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2014.

Além das informações relativas ao solo constantes na tabela 7.1, nas simulações foi utilizada a depleção inicial na camada evaporável de 50% e depleção inicial nas camadas inferiores de 30%. O solo utilizado pertence à classe textural franco e não apresenta sinais de compactação, apresentando densidade em todas as camadas avaliadas menor que a considerada crítica para solos nesta faixa de argila, que é de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, bem como, valores de macroporosidade acima de $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, valor crítico ao desenvolvimento das raízes da maioria das culturas (MICHELON et al., 2007).

Tabela 7.2 Parâmetros culturais utilizados nas simulações com o Modelo SIMDualKc. Santa Maria, RS, 2014.

Parâmetro	Sem.	Ini.	Med.	Sen.	Col.
Feijão					
Datas	18/01/2011	30/01/2011	25/02/2011	01/04/2011	30/04/2011
p^{**}	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Profundidade das raízes (m)**	0,15	0,30	0,55	0,55	0,55
Altura das plantas (m)*	0,00	0,10	0,50	0,95	0,95
Cobertura do solo pelo dossel*	0,01	0,28	0,70	0,99	0,5
K_{cb} inicial**		0,15			
K_{cb} médio**		1,00			
K_{cb} final**		0,80			
Milho					
Datas	09/01/2012	31/01/2012	20/02/2012	23/04/2012	15/05/2012
p^{***}	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Profundidade das raízes (m)**	0,15	0,50	0,80	0,80	0,80
Altura das plantas (m)*	0,00	0,19	1,00	2,10	2,10
Cobertura do solo pelo dossel*	0,01	0,30	0,72	0,99	0,70
K_{cb} inicial***		0,20			
K_{cb} médio***		1,12			
K_{cb} final***		0,20			

Onde: Sem.: Semeadura; Ini.: Início do rápido crescimento; Med.: Início do médio crescimento; Sen.: Senescência; Col.: Colheita; p : fração de esgotamento da água do solo em conforto hídrico; K_{cb} : Coeficiente de cultura basal.

*Determinado à campo; **Conforme Allen et al. (1998); ***Calibrado por Martins et al. (2013).

Na tabela 7.3 são apresentadas as características das chuvas simuladas aplicadas durante o ciclo das culturas do feijão e milho que foram utilizadas nas simulações do modelo SIMDualKc.

A partir das características do solo (Tabela 7.1), das condições meteorológicas (Figura 7.2), do manejo das culturas (Tabela 7.2) e do volume das chuvas simuladas (Tabela 7.3) foram realizadas várias simulações com o modelo SIMDualKc, estimando-se o volume de escoamento superficial e de chuva efetiva. Primeiramente utilizando-se valores de CN padrão, sugeridas em tabela auxiliar do modelo, conforme Allen et al. (2007) e USDA-SCS (1972), cujo valor é de 75 para ambas as culturas em condição de umidade do solo AMC II. O volume de

escoamento superficial estimado foi comparado ao observado a campo, procedendo-se o ajuste no valor de CN de forma a obter o melhor ajuste nos indicadores estatísticos.

Tabela 7.3. Características do momento de aplicação e volume das chuvas simuladas. Santa Maria, RS, 2014.

DAS	CS (%)	Intensidade da chuva		
		35 mm h ⁻¹	70 mm h ⁻¹	105 mm h ⁻¹
Feijão				
02	0	77,86	141,74	213,64
17	28	71,18	145,01	209,75
30	63	76,98	138,31	208,00
44	100	75,34	141,69	210,46
Milho				
02	0	69,12	136,75	204,56
21	30	71,89	142,66	206,68
36	72	72,67	147,40	213,92
49	100	71,22	142,27	208,38

Onde: DAS: Dias após a sementeira; CS: Cobertura do solo pelo dossel da cultura.

Para a avaliação dos valores de escoamento estimados foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular (b), o erro médio (ME) (Equação 2) e a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) (Equação 3). O R^2 é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear em relação aos valores observados, variando entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, ou seja, quanto maior o R^2 , mais explicativo é modelo, melhor ele se ajusta à amostra. O valor de "b" o mais próximo de 1, indica que o modelo não apresenta uma tendência de superestimativa ou subestimativa dos dados. O ME é uma variável que indica a direção média dos desvios de um conjunto de dados estimados a partir de um conjunto de valores observados (Equação 5.1). Este valor indica a tendência, se o modelo está superestimando (ME positivo) ou subestimando (ME negativo). O RMSE (Equação 5.2) dá a medida do erro médio que está sendo cometido (WILKS, 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do volume de escoamento observado para os diferentes volumes de chuvas simuladas aplicadas durante o ciclo de desenvolvimento do feijão e do milho, em solo com e sem palha na superfície e, os valores de escoamento simulados pelo modelo SIMDualKc através do método CN padrão estão apresentados na figura 7.3.

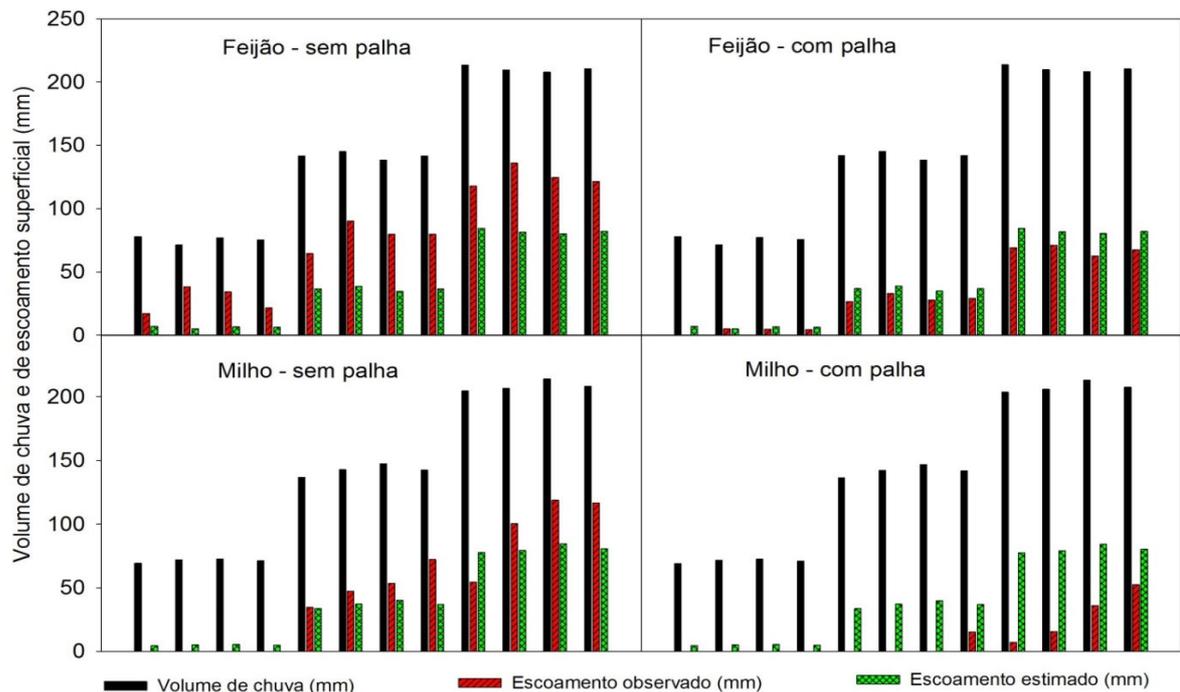


Figura 7.3 Resultado do volume de chuva e de escoamento superficial observado e simulado pelo modelo SIMDualKc através do Método Curva Número, durante o ciclo de desenvolvimento do feijão e do milho, em solo com e sem palha na superfície. Santa Maria, RS, 2014.

As pequenas diferenças nos valores de escoamento estimado entre as duas culturas são atribuídas a ajustes efetuados pelo modelo SIMDualKc em função das condições de umidade no solo antecedentes a ocorrência das chuvas simuladas, pois o valor de CN é tabelado no modelo, sendo este igual para ambas culturas (CN 75). De acordo com Rosa et al., (2012), no modelo SIMDualKc o valor de CN é ajustado diferenciadamente de acordo com a correspondência entre a depleção de água na zona radicular e três condições pré-estabelecidas de umidade do solo, AWC (condição de solo seco), AWC II (condição mediana de umidade no solo) e AWC III (condição de solo úmido).

Analisando-se a figura 7.3, observa-se que o modelo SIMDualKc não considera as diferentes condições de cobertura da superfície do solo por palha para a estimativa do escoamento superficial. Com isso, os valores de escoamento superficial estimados pelo modelo foram iguais para ambas às situações de cobertura, resultando na subestimativa do escoamento para o solo sem palha na superfície e superestimativa para o solo com palha na superfície, em ambas as culturas. A presença de palha na superfície do solo causou reduções no escoamento superficial superior a 40% para todos os volumes de chuvas aplicados. Essa redução no escoamento superficial é discutida por vários autores que relatam a eficácia de sistemas de manejo do solo que visam a manutenção da palha sobre a superfície, como o sistema de plantio direto, no controle do escoamento superficial (COGO et al., 2003; CASSOL et al. 2004, SILVA et al. 2005; DELAUNE; SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

A necessidade de ajuste do método CN para solos com elevadas quantidades de palha sobre a superfície foi levantada por diversos autores em nível mundial (HUANG et al., 2006; EBRAHIMIAN et al., 2012; CARLESSO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012; DESHMUKH et al., 2013, HUANG et al., 2013). Inclusive para o Brasil, Pruski (1990) e Pruski et al. (2008), definiram para o método CN parâmetros relativos ao uso do solo, tratamento e condição hidrológica, em que a cobertura pode ser englobada como boa, regular e má. Contudo, o modelo SIMDualKc considera os benefícios da palha na superfície do solo apenas na redução da evaporação. De acordo com Rosa et al. (2012), o utilizador define a percentagem de redução da evaporação (coeficiente de evaporação, K_e) a partir da cobertura do solo, dando o modelo valores indicativos desta redução, tal como apresentado em Allen et al. (2007), que sugerem uma redução de 5% da evaporação para cada 10% de cobertura do solo.

Considerando as diferenças expressivas nos valores de escoamento observados para solo sem e com palha na superfície e a não representatividade destas pelo modelo SIMDualKc, realizou-se ajustes nos valores de CN para as culturas do feijão e do milho. A tabela 7.4 apresenta os indicadores estatísticos comparando os valores de escoamento observados com os estimados pela CN.

Tabela 7.4 Indicadores estatísticos comparando os valores de escoamento observados com os valores estimados pelo modelo SIMDualKc. Santa Maria, RS, 2014.

Solo sem palha na superfície					Solo com palha na superfície				
CN	b	R ²	RMSE	ME	CN	b	R ²	RMSE	ME
Feijão									
75	0,58	0,94	37,78	-35,47	75	1,22	0,99	9,88	8,31
80	0,75	0,94	24,62	-22,49	65	0,70	0,99	13,25	-11,28
85	0,94	0,95	12,15	-6,86	70	0,94	0,99	3,53	-2,45
86	0,98	0,95	10,96	-3,36	72	1,05	0,99	3,09	1,69
87	1,02	0,95	10,94	0,27	71	0,99	0,99	2,39	-0,46
Milho									
75	0,75	0,86	20,62	-9,00	75	2,10	0,53	37,49	30,26
76	0,79	0,86	19,14	-6,64	60	0,64	0,65	11,60	4,13
78	0,87	0,86	17,01	-1,63	57	0,69	0,69	10,63	0,66
79	0,91	0,86	16,57	1,00	56	0,88	0,69	10,70	-0,39

Onde: CN: valor de Curva Número utilizado; b = coeficiente angular; R² = coeficiente de determinação; RMSE = raiz quadrada do erro médio ao quadrado, expresso em mm; ME = erro médio, expresso em mm.

Verifica-se uma melhoria nos indicadores estatísticos, maior proximidade do coeficiente b e do R² de 1 e uma redução do RMSE e do ME, com o aumento dos valores de CN para o solo sem palha e com a redução dos valores de CN para o solo com palha. Visto que o valor padrão de CN (75) resulta para o solo sem palha na superfície em uma subestimativa do escoamento de 35,47 e 9,00 mm para as culturas do feijão e do milho, respectivamente, enquanto que, para o solo com palha na superfície em uma superestimativa de 8,31 e 30, 26 mm, respectivamente.

Assim, os valores sugeridos de CN para a utilização no modelo SIMDualKc, em solo sem palha na superfície, são de 87 e 79 para as culturas do feijão e do milho, respectivamente, o que implica em uma pequena superestimativa do escoamento superficial de 0,27 e 1,00 mm, respectivamente. Enquanto que, para o solo com palha na superfície os valores recomendados de CN são de 71 e 56 para as culturas do feijão e do milho, respectivamente, resultando em reduzida subestimativa do escoamento de 0,46 e 0,39 mm.

A simulação do balanço hídrico do solo sem palha na superfície efetuada pelo modelo SIMDualKc com os novos valores de CN está apresentada na figura 7.4 para o feijão e na figura 7.5 para o milho.

O modelo SIMDualKc considera chuva efetiva como a diferença entre a chuva total e o escoamento superficial. Diferente do conceituado na literatura, como a diferença entre a chuva total e as diferentes perdas, como escoamento superficial,

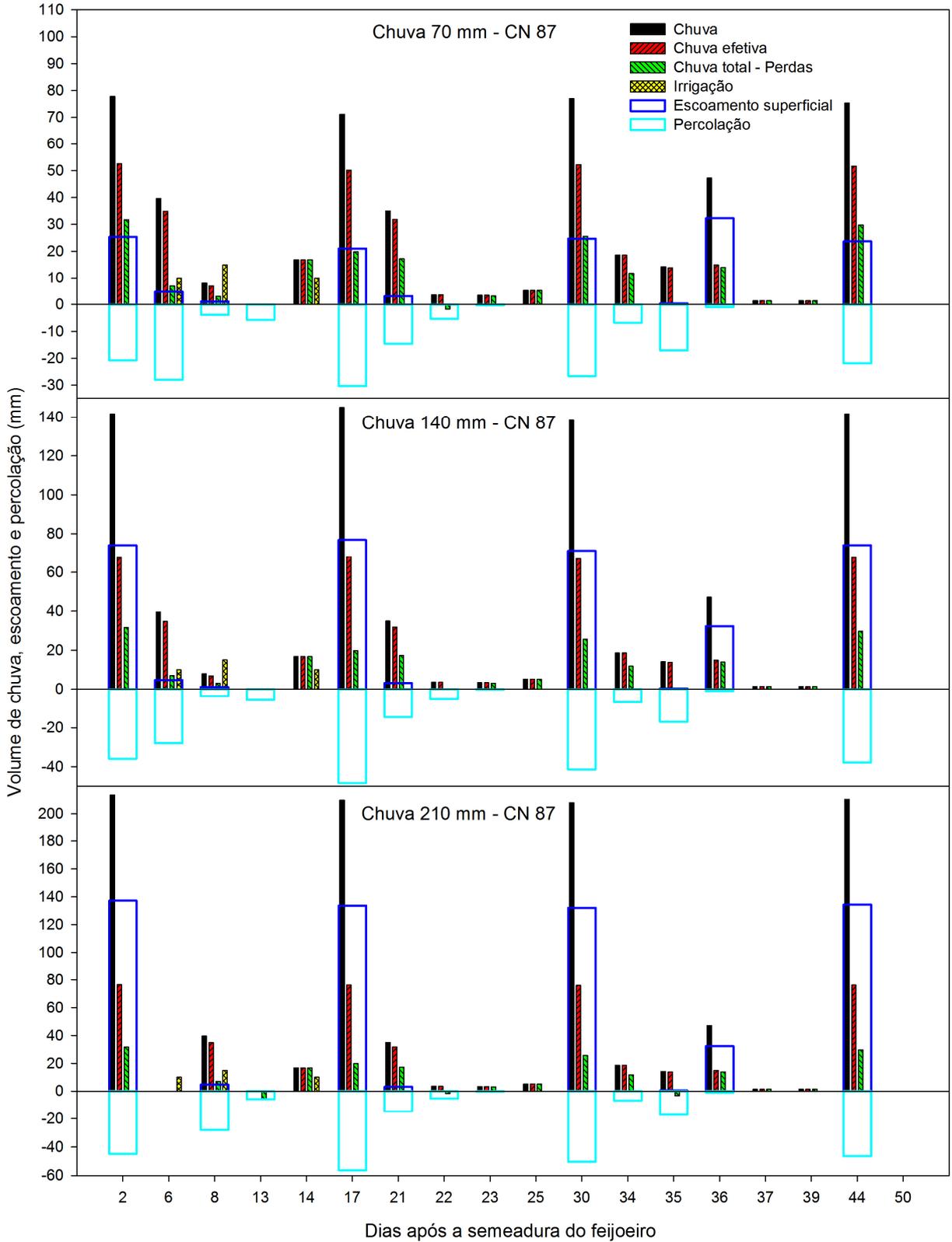


Figura 7.4 Valores de chuva efetiva, percolação e escoamento superficial simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes volumes de chuvas e irrigação ocorridos durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro cultivado em solo sem palha na superfície. Santa Maria, RS, 2014.

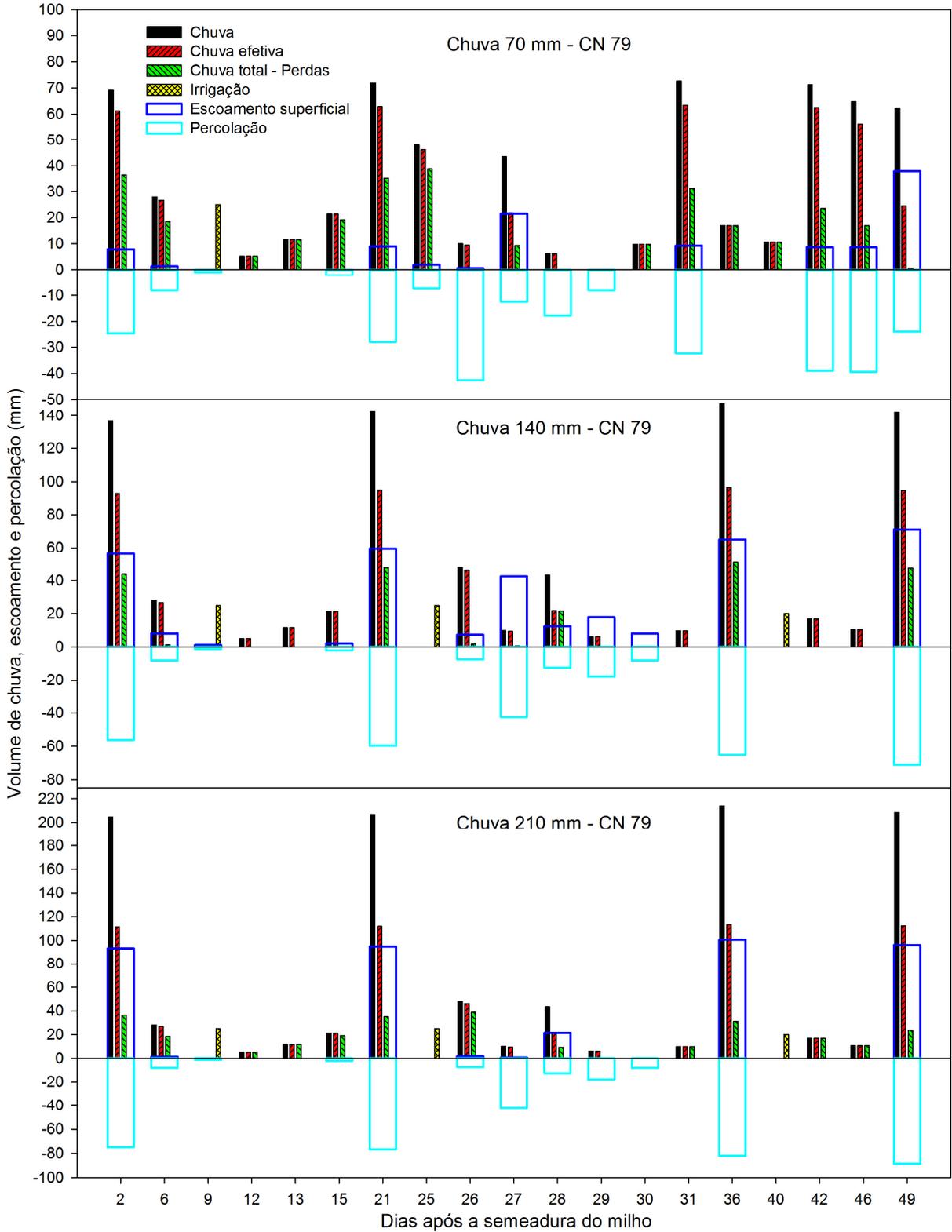


Figura 7.5 Valores de chuva efetiva, percolação e escoamento superficial simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes volumes de chuvas e irrigação ocorridos durante o ciclo de desenvolvimento do milho cultivado em solo sem palha na superfície. Santa Maria, RS, 2014.

percolação profunda e evaporação da água interceptada pela vegetação (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008). No modelo, a percolação profunda é um parâmetro fundamental para o cálculo diário do balanço hídrico do solo e é apresentado separadamente. Desta forma, calculou-se a chuva efetiva como a diferença entre a chuva total e a perdas por escoamento superficial e percolação profunda.

Nas figuras 7.4 e 7.5 observa-se a ausência de escoamento superficial para chuvas de baixo volume e, para um mesmo volume de chuva, escoamento superficial superior para a cultura do feijão, indicando que com o ajuste da CN o modelo SIMDualKc representa com uma pequena superestimativa (Tabela 7.4) o observado a campo (Figura 7.2). Neste caso, para um mesmo volume de chuva total a chuva efetiva é maior para a cultura do milho. Observa-se para uma chuva total de 71 mm uma chuva efetiva de 50 e 62 mm, para as culturas do feijão e do milho, respectivamente. Para chuvas de maior volume, essa diferença é ainda mais expressiva, para uma chuva de 207 mm a chuva efetiva foi de 76 e 111 mm para as culturas do feijão e do milho, respectivamente.

O outro conceito de chuva efetiva abordado considera a chuva total menos as perdas por escoamento superficial e percolação profunda (DASTANE, 1974; SAMPAIO et al., 2000; BARBOSA et al., 2005; RAHMAN et al., 2008). Assim, para a cultura do feijão, chuvas totais de 70, 141 e 203 mm resultam em chuvas efetivas de 31 mm. Do mesmo modo, para a cultura do milho, chuvas totais de 69, 136 e 204 mm resultam em chuvas efetivas de 36 mm. Em ambos casos, mesmo que as perdas por escoamento superficial sejam diferenciadas entre os volumes de chuvas, considera-se que atingido a capacidade máxima de armazenamento de água do solo o restante da água é perdida por percolação profunda. Demonstrando nesse conceito de chuva efetiva, que a capacidade de armazenamento de água no solo e as condições de umidade do solo antecedentes a chuva são variáveis mais importantes que o escoamento superficial.

A simulação do balanço hídrico do solo com palha na superfície efetuada pelo modelo SIMDualKc com os novos valores de CN está apresentada na figura 7.6 para o feijão e na figura 7.7 para o milho.

Para o solo com palha, o modelo SIMDualKc representou satisfatoriamente as condições observadas a campo (Figura 7.3) de ausência de escoamento superficial para chuvas de baixo volume e, para um mesmo volume de chuva aplicada, o

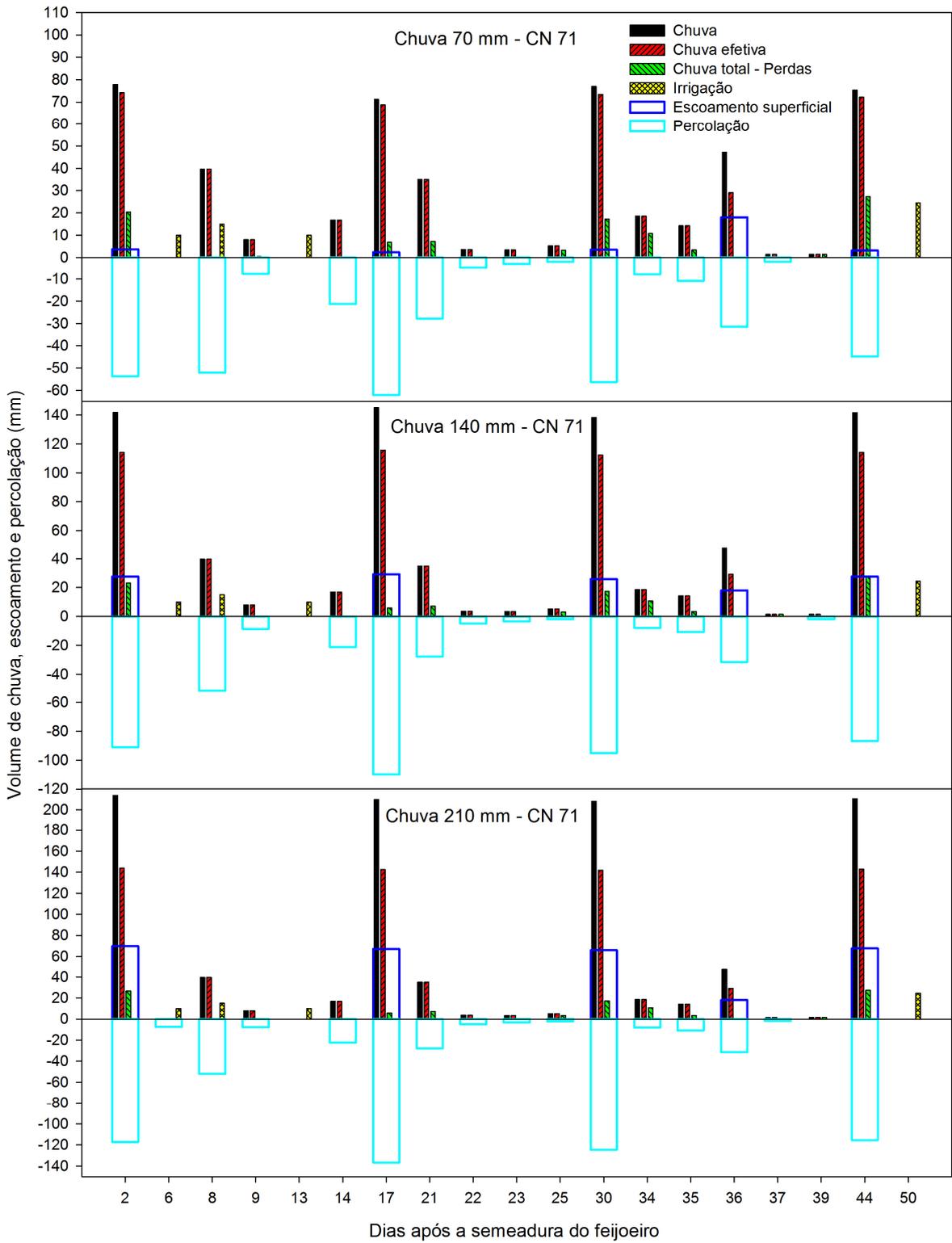


Figura 7.6 Valores de chuva efetiva, percolação e escoamento superficial simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes volumes de chuvas e irrigação ocorridos durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro cultivado em solo com palha na superfície. Santa Maria, RS, 2014.

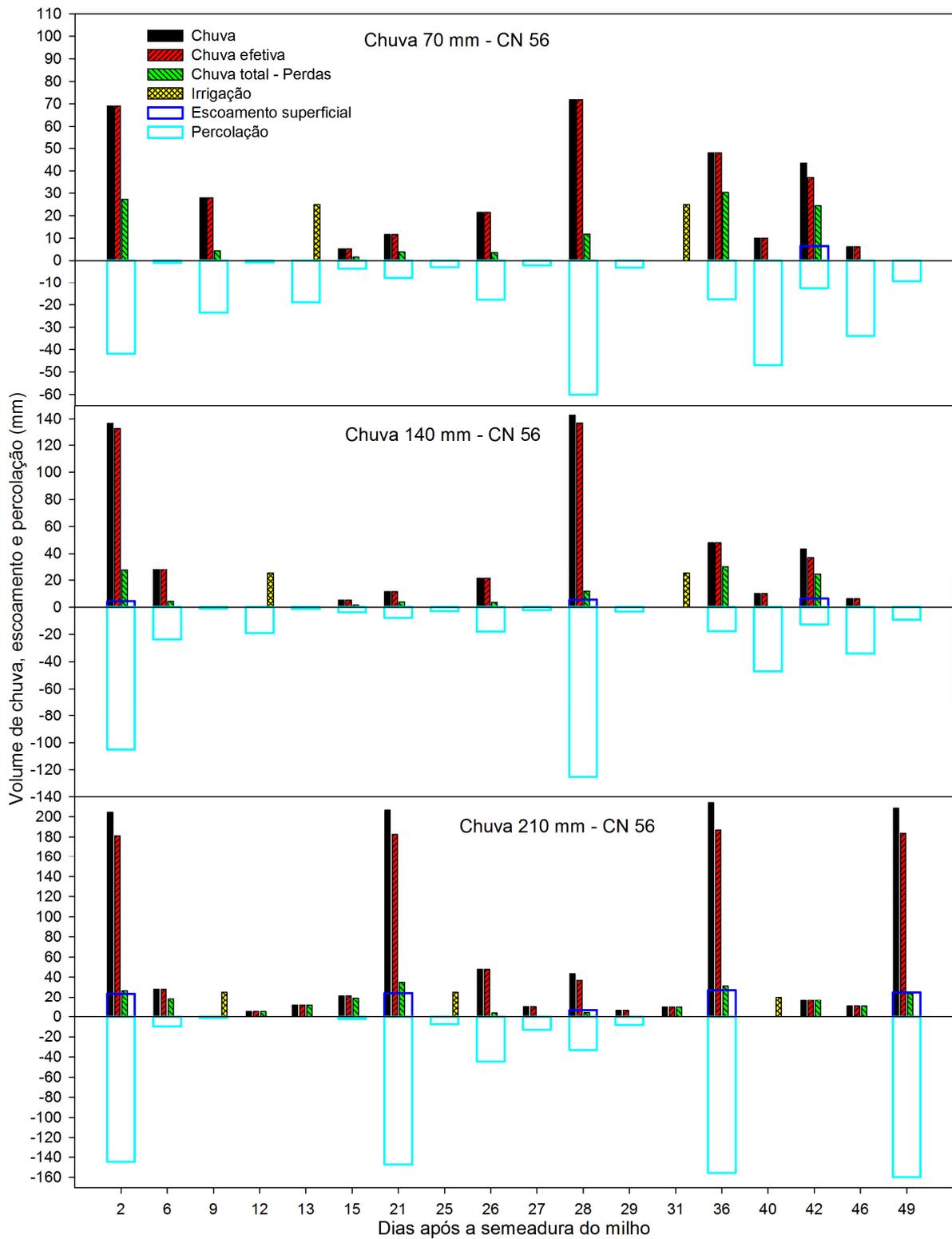


Figura 7.7 Valores de chuva efetiva, percolação e escoamento superficial simulados pelo modelo SIMDualKc, para os diferentes volumes de chuvas e irrigação ocorridos durante o ciclo de desenvolvimento do milho cultivado em solo com palha na superfície. Santa Maria, RS, 2014.

escoamento superficial foi superior para a cultura do feijão. Além disso, os ajustes na CN para a situação de solo com palha proporcionaram reduções no escoamento superficial superior a 40% em comparação ao solo sem palha na superfície (Figuras 7.3 e 7.4), conforme observado a campo (Figura 7.3). Com isso, os valores de chuva efetiva foram maiores no solo com palha (Figuras 7.6 e 7.7) em comparação ao solo sem palha (Figuras 7.4 e 7.5). Observa-se na cultura do feijão (Figuras 7.4 e 7.6), para uma chuva de 210 mm uma chuva efetiva de 76 mm no solo sem palha e de 142 mm no solo com palha. Do mesmo modo, para a cultura do milho (Figuras 7.5 e 7.7), uma chuva total de 210 mm resultou em 113 mm de chuva efetiva para solo sem palha e 186 mm para o solo com palha.

Pode-se observar que, os ajustes nos valores de CN resultaram em melhores estimativas do escoamento superficial pelo modelo SIMDualKc para as culturas do feijão e do milho cultivadas em solo sem e com palha na superfície, com valores de erro médio inferiores a 1 mm (Tabela 2). Com isso, obteve-se uma maior precisão na estimativa da chuva efetiva pelo modelo que pode ser visualizada na figura 7.8.

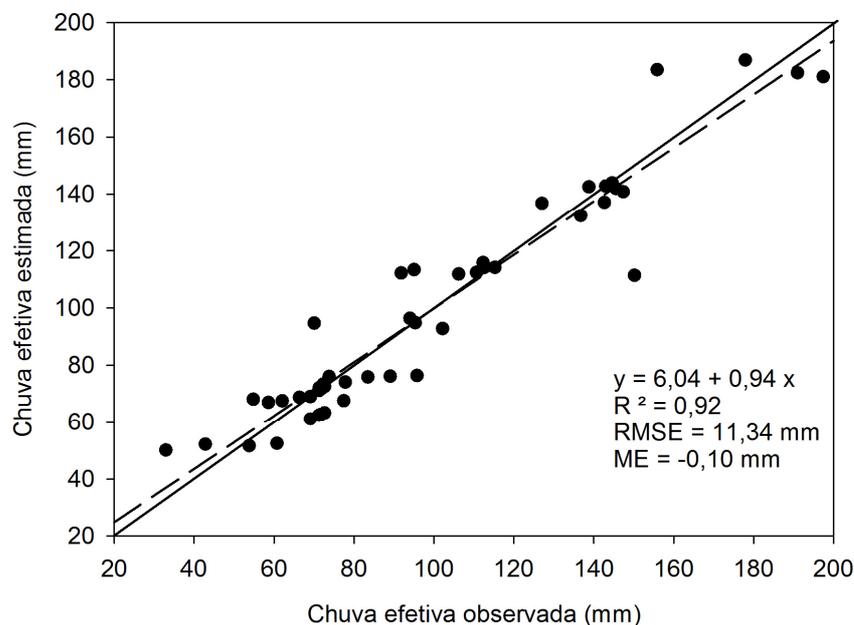


Figura 7.8 - Relação 1:1 (linha cheia) e linha de tendência (linha pontilhada) para a chuva efetiva observada e estimada pelo modelo SIMDualKc. Santa Maria, RS, 2014.

Conforme demonstra a figura 7.8, considerando as diferentes situações de estudo: volumes de chuvas aplicados (70, 140 e 210 mm), solo sem e com palha na superfície e culturas do feijão e do milho, a estimativa da chuva efetiva pelo modelo

SIMDualKc após os ajustes nos valores de CN foi muito similar a observada, com uma pequena subestimativa de 0,1 mm.

CONCLUSÕES

O modelo SIMDualKc pode ser utilizado para estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva, como uma alternativa para facilitar a obtenção destas variáveis que são de difícil determinação em nível de campo, desde que sejam efetuados ajustes no valor de CN conforme a cobertura do solo por palha e ao tipo de cultivo.

O modelo SIMDualKc não considera os efeitos da palha na superfície do solo para estimar o escoamento superficial, sendo que neste estudo, esta resultou em uma redução de 40% no escoamento superficial observado. Desta forma, o Modelo subestimou o escoamento superficial em até 35 mm para o solo sem palha e superestimou em até 30 mm para o solo com palha na superfície.

O valor tabelado no modelo SIMDualKc de CN (75) foi ajustado para 87 e 79, para as culturas do feijão e milho, respectivamente, resultando em uma superestimativa do escoamento superficial inferior a 1 mm para o solo sem palha na superfície.

O valor tabelado no modelo SIMDualKc de CN (75) foi ajustado para 71 e 56, para as culturas do feijão e milho, respectivamente, resultando em uma subestimativa do escoamento superficial inferior a 0,5 mm para o solo com palha na superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., CLEMMENS, A. J., BURT, C. M., SOLOMON, K., O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 24 - 36, 2005.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, FAO, Rome, Italy, 1998. 300 p.

ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W. O.; PEREIRA, L. S.; JENSEN, M. E. Water requirements. In G. J. Hoffman, R. G. Evans, M. E. Jensen, D. L. Martin, R.

L. Elliot (Eds.). **Design and operation of farm irrigation systems** (2nd ed.), p. 208 - 288, St. Joseph, MI: ASABE, 2007.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do número de curva (CN/SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, p. 264-279, 2012.

BANASIK, K., WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 36, n. 1, jan.-abr., p. 24 - 33, 2005.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; FABIAN, E. L.; PEGORARO, R.; ZAVASCHI, E.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háplico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243 - 250, 2008.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I.; ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 781 - 792, 2007.

CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774- 3789, 2011.

CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, n. 98, p. 1020 - 1026, 2011.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A.. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n. 7, p. 685 - 690, 2004.

CEPEF - Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão. **Indicações técnicas para a cultura do feijão no Rio Grande do Sul 2007/08**. Pelotas, 2007. 110p.

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.

DASTANE, N.G. Effective rainfall and irrigated water requirements. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743 - 753, 2003.

DELAUNE, P.B.; SIJ, J.W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.32-35, 2012.

DESHMUKH, D. S.; CHAUBE, U. C.; HAIJULU, A. E; GUDETA, D. A.; KASSA, M.T. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology**. v 492.p 89-101, 2013.

DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, G. A.; GROVE, J. H. A review of notill systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 65, n. 1, p. 1-18, 2002.

EBRAHIMIAN, M.; AINUDDIN, A.B.; SOOM, M. A. B. M.; SOOD, A. M.; NENG, L. J. Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-

Adjusted Curve Number Methods. **Journal of Environmental Studies**. Vol. 21, No. 5 1191-1202, 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

ENGEL, F. L.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; COGO, N. P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 2, p. 187 - 193, 2007.

FABRIZZI, K. P.; GARCÍA, F. O.; COSTA, J. L.; PICONE, L. I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 81, n. 1, p. 57 - 69, 2005.

FANDIÑO, M.; CANCELA, J. J.; REY, B. J.; MARTÍNEZ, E. M.; ROSA, R. G.; PEREIRA, L. S. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albariño) with consideration of active ground cover. **Agricultural Water Management**, v. 112, p. 75 - 87, 2012.

HOWELL, T. A.; EVETT, R.; TOLK, J. A.; SCHNEIDER, A. D. Evapotranspiration of full, deficit irrigated, and dry land cotton on the Northern Texas High Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 130, n. 4, p. 277 - 285, 2004.

HUANG, J.; ZHAO, X.; WU, P. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events. **Journal of Soil and Water Conservation**. July/August vol. 68 no. 4 283-295, 2013.

HUANG, M.; GALLICHAND, J. 2; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, 20, 579–589, 2006.

LIU, Y.; PEREIRA, L. S.; FERNANDO, R. M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. **Agricultural Water Management**, v. 84, p. 27 - 40, 2006.

LIU, Y.; TEIXEIRA, J. L.; ZHANG, H. J.; PEREIRA, L. S. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 36, p. 233 - 246, 1998.

MACHADO, P. L. O. de A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 119 - 130, 2011.

MARTINS, J. D.; RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v.115, p. 291 - 310, 2013.

MELO, G. L. Caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul. 95p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2006.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DE DAVID, G.; SANTA, C. D. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1308 - 1315, 2007.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524–534, 2011.

OLIVEIRA Z, B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A.E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Revista Irriga**, v. 18, n. 3, p. 415 - 425, 2013.

PAÇO, T. A.; FERREIRA, M. I.; ROSA, R. D.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; CONCEICÃO, N.; PACHECO, C. A.; PEREIRA, L. S. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance measurements. **Irrigation Science**, v. 30, n. 2, p. 115 - 126, 2012.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261 - 268, 2006.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; BICCA, D. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1777 - 1786, 2011.

PRUSKI, F.F. Análises de precipitações extremas e de escoamento superficial, para áreas agrícolas, da região Oeste do Paraná. Viçosa-MG, 1990. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; DEMETRIUS, D.D. **Escoamento superficial**. Ed. UFV, 2 ed, Viçosa-MG, 2008.

RAHMAN, M.M.; ISLAM, M.O.; HASANUZZAMAN, M. Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh. **World Journal of Agricultural Sciences**. v.4; p. 453-457, 2008.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204 - 1213, 1972.

RODRIGUES, L. R.; SILVA, P. R. F (org.). **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2011/2012 e 2012/2013**. Porto Alegre: Fepagro, 2011.

ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**, v. 103, p. 8 - 24, 2012.

SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; BÔAS, M. A. V.; OLIVEIRA, L. F. C. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 210-213, 2000.

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

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R., GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G., PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, n.1, 2009.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils. **Transactions of ASAE**, v. 44, p. 1553 - 1558, 2001.

USDA-SCS (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture). **National Engineering Handbook**, USDA, 1972.

WILKS, D. S. Forecast verification. In: Statistical methods in the atmospheric sciences. v.1. Cornell University, San Diego, United States of America, p. 255 - 336, 1995.

ZHAO, N. N.; LIU, Y.; CAI, J. B.; ROSA, R.; PAREDES, P.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheatesummer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 93 - 105, 2013.

DISCUSSÃO

Na determinação e caracterização das perdas de água por escoamento superficial em diferentes situações de cobertura do solo por palha e pelas culturas do feijão e milho, declividades do terreno e intensidades de chuvas simuladas, artigos 1 e 2, observou-se que as variáveis medidas a campo: (i) tempo de início do escoamento superficial, (ii) taxa constante de escoamento superficial, (iii) volume total de escoamento superficial e, (iv) porcentagem de escoamento em relação ao volume da chuva, são pouco influenciadas pelo desenvolvimento das culturas. Diferente do esperado, não houve para as duas culturas, a atenuação das perdas por escoamento superficial com o incremento do dossel vegetativo das plantas. Isto contraria alguns trabalhos no que se refere à capacidade da cobertura do solo pelo dossel vegetal em amenizar o escoamento superficial (MELLO et al., 2003; ENGEL et al., 2007; HUANG et al., 2013).

Pode-se comprovar, para as diferentes intensidades de chuvas e declividades do terreno, em ambas as culturas, que a presença de palha na superfície do solo foi mais efetiva que o desenvolvimento do dossel das plantas nas reduções das perdas de água por escoamento superficial. As reduções no escoamento superficial proporcionadas pela presença de palha na superfície do solo foram de até 45 e 48% para as culturas do feijão e do milho, respectivamente. Isto demonstra a importância dos sistemas de cultivo do solo que visam à manutenção da palha na superfície do solo para a conservação do solo e da água (COGO et al., 2003; CASSOL et al. 2004, SILVA et al. 2005; DELAUNE; SIJ, 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

Além disso, observou-se que algumas variáveis medidas a campo sofrem forte influência da intensidade da chuva e da declividade do terreno. Valores elevados de escoamento superficial, de até 81% do volume aplicado, foram observados para a declividade do terreno de 10% e intensidade de chuva de 105 mm h⁻¹. Corroborando com os resultados obtidos por Panachuki et al. (2006), Carlesso et al. (2011) e Oliveira et al. (2013), que intensidades de chuva mais elevadas aumentam as perdas de água por escoamento superficial e causam redução no tempo de início do escoamento, independente das condições da superfície do solo. Assim como, quanto mais acentuada a declividade do terreno

maior será o volume de escoamento superficial (HUANG et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2010; CARLESSO et al., 2011; OLIVEIRA et al. 2013).

Na comparação dos valores de escoamento superficial medidos com os valores estimados pelo método CN, observou-se para a cultura do feijão (Artigo 1), que o método CN subestimou o escoamento superficial em até 22 mm para o solo sem palha e superestimou em até 25 mm para o solo com palha. Para a cultura do milho (Artigo 2), o método CN superestimou o escoamento superficial em até 66,31 mm. Além disso, verificou-se através de baixos valores do índice Nash e Sutcliffe (NSE) a dificuldade do método CN em prever o escoamento superficial em solo com palha na superfície, para ambas as culturas, justificando a necessidade de ajustes nos valores de CN, o que foi proposto nesse estudo.

Desta forma, identificou-se para a cultura do feijão que os valores ideais do parâmetro CN para o solo sem palha na superfície são de 85, 84 e 82, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Enquanto que, para solo com palha na superfície, os valores ideais do parâmetro CN são de 71, 67 e 61, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

Na cultura do milho, os valores ajustados de CN para o solo sem palha na superfície são de 61, 64,5 e 68,5 para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Enquanto que, para solo com palha na superfície os valores foram de 44, 39 e 42,5, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente. Novos valores do CN também foram determinados por Wang; Huang (2008), Jin et al. (2003), Zhang et al. (2004) e Gao et al. (2006), usando o escoamento medido para calcular os valores do CN.

Após o ajuste nos valores de CN, para a cultura do feijão o método CN superestimou o escoamento superficial em até 11 mm para o solo com palha e em até 10 mm para o solo sem palha na superfície. Para a cultura do milho, os valores ajustados da CN resultaram em superestimativas do escoamento superficial inferiores a 2 mm, para as diferentes condições de cobertura da superfície e intensidades de chuvas.

Com isso, evidencia-se a importância do ajuste dos valores de CN do método CN para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas, adequando o método às condições de cobertura do solo e tipo de cultura, garantindo uma maior precisão na determinação da chuva efetiva e, com isso, melhorando a eficiência do

uso da água de irrigação e do consumo de energia, contribuindo para a conservação dos recursos naturais.

Na modelagem do escoamento superficial com a utilização de análises de regressão linear múltiplas (Artigo 3), verificou-se que o volume de chuvas seguido da cobertura do solo por palha são as variáveis com maior correlação com o escoamento superficial, apresentando as maiores contribuições no R^2 para a composição das equações multivariadas. Este resultado vai de acordo com o observado a campo, pois houve aumento acentuado nas perdas de água por escoamento superficial com o incremento da intensidade da chuva e, reduções expressivas do volume do escoamento superficial com o uso da palha na superfície do solo. Enquanto que, as variáveis declividade do terreno e cobertura do solo pelo dossel vegetativo exerceram menor influência no escoamento superficial.

Das quatro equações geradas, a Equação 4, que possui o maior número de variáveis de entrada ($E_t = 0,611 \cdot Ch - 7,973 \cdot Pal + 1,720 \cdot Dec + 0,131 \cdot Fc - 23,869$, onde E_t : escoamento superficial total (mm); Ch : volume de chuva (mm); Pal : quantidade de palha na superfície do solo ($Mg\ ha^{-1}$); Dec : declividade do terreno (%); e Fc : fator de cobertura do solo pelo dossel vegetativo (%), avaliada para um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem, não apresentou a maior precisão da estimativa do escoamento superficial. A Equação 2, que possui apenas 2 parâmetros de entrada ($E_t = 0,611 \cdot Ch - 7,973 \cdot Pal - 14,763$), apresentou a menor subestimativa (18 mm) do escoamento superficial de um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem. Neste caso, observou-se que a equação multivariada proposta para a estimativa do escoamento superficial apresentou resultados similares aos da metodologia padrão (Método CN) que superestimou o escoamento em 17 mm.

Deve-se considerar antes de adotar estas metodologias que, a superestimativa no escoamento superficial pela metodologia CN resulta em menores valores de chuva efetiva, demandando irrigações mais frequentes e aumentando os custos da agricultura irrigada. Já, a subestimativa do escoamento superficial pela equação multivariada (equação 2) resulta na superestimativa da chuva efetiva, implicando em irrigação mais espaçadas, o que pode levar a um déficit hídrico e comprometer a produção do cultivo.

Por fim, a utilização do modelo SIMDualKc para estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo das culturas de feijão e milho (Artigo 4),

como uma alternativa para facilitar a obtenção destas variáveis que são de difícil determinação em nível de campo, implicou na necessidade de ajustes no modelo.

O ajuste foi necessário, pois o Método CN utilizado pelo modelo SIMDualKc para estimar o escoamento superficial não considera os benefícios da palha na superfície do solo para a redução do escoamento superficial. No Brasil, Pruski (1990, 2008), definiu para o Método CN parâmetros relativos ao uso do solo, tratamento e condição hidrológica, em que a cobertura pode ser englobada. Estes parâmetros estão sendo utilizados em estudos envolvendo a metodologia CN para a estimativa do escoamento superficial (CARLESSO et al., 2011; ARAÚJO NETO et al., 2012). Além disso, a necessidade de ajuste do Método CN para solos com elevadas quantidades de palha sobre a superfície foi levantada por diversos autores em nível mundial (HUANG et al., 2006; EBRAHIMIAN et al., 2012; DESHMUKH et al., 2013). Contudo, o modelo SIMDualKc considera os benefícios da palha na superfície do solo apenas na redução da evaporação (ROSA et al., 2012).

Após os ajustes nos valores de CN (CN 75), em novos valores de 71 e 87 para a cultura do feijão e de 56 e 79 para a cultura do milho, para o solo com e sem palha na superfície, respectivamente, a estimativa da chuva efetiva pelo modelo SIMDualKc foi muito similar a observada a campo.

Dessa forma, o presente estudo apontou alternativas que auxiliam na estimativa do escoamento superficial e da chuva efetiva, evidenciando a importância de estudos que buscam novas metodologias ou ajustes nas metodologias existentes para propiciar uma estimativa mais precisa, especialmente, para situações que requerem estimativas minuciosas, como o balanço hídrico de água no solo e o manejo da irrigação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tempo de início do escoamento superficial, a taxa constante de escoamento, o volume total de escoamento e a porcentagem de escoamento em relação ao volume da chuva, foram pouco influenciadas pelo desenvolvimento das culturas de feijão e milho, independente da presença ou não de palha na superfície do solo, da declividades do terreno e da intensidades da chuva.

Reduções no escoamento superficial foram proporcionadas pela presença de palha na superfície do solo, em até 45 e 48% para as culturas do feijão e milho, respectivamente. Valores elevados de escoamento superficial de até 81% do volume da chuva foram observados no solo sem palha na superfície, na declividade do terreno de 10% e intensidade de chuva de 105 mm h⁻¹.

O método Curva Número (CN) para a cultura do feijão subestimou o escoamento superficial em até 22 mm ou 10% para o solo sem palha na superfície e superestimou em até 25 mm ou 17% para o solo com palha. Para a cultura do milho, o método superestimou o escoamento superficial em até 66,31 mm ou 32,4 % no solo com palha e 9,5 mm ou 12 % no solo sem palha. Além disso, verificou-se baixos ajustes entre o escoamento superficial observado e estimado pelo método CN para ambas as culturas, principalmente em solo com palha na superfície, indicando a necessidade de ajustes nos valores de CN.

Para a cultura do feijão, os valores ajustados do parâmetro CN para o solo sem palha na superfície são de 85, 84 e 82, enquanto que, para solo com palha na superfície os valores são de 71, 67 e 61, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

Na cultura do milho, os valores ajustados de CN para o solo sem palha na superfície são de 61, 64,5 e 68,5, enquanto que, para solo com palha na superfície os valores foram de 44, 39 e 42,5, para as intensidades de chuva de 35, 70 e 105 mm h⁻¹, respectivamente.

A utilização de análises de regressão linear múltiplas indicaram que o volume da chuva ($R^2=0,52$) e a cobertura do solo por palha ($R^2=0,18$) são as variáveis com maior influência sobre o escoamento superficial. Foram geradas 4 equações múltiplas, sendo que a equação 2 ($E_t = 0,611 \cdot Ch - 7,973 \cdot Pal - 14,763$, onde E_t : escoamento superficial total (mm); Ch : volume de chuva (mm) e Pal : quantidade de

palha na superfície do solo (Mg ha^{-1}), foi a que apresentou a melhor estimativa do escoamento superficial (subestimativa de 18 mm) de um conjunto de dados diferente daquele que lhe deu origem, com resultado similar ao estimado pelo método (superestimou em 17 mm).

O modelo SIMDualKc necessitou de ajustes para estimar o escoamento superficial e a chuva efetiva durante o ciclo das culturas de feijão e milho, para considerar os benefícios da palha na superfície do solo na redução do escoamento superficial. Desta forma, o valor sugerido de CN (75) deve ser alterado para 71 e 87 para a cultura do feijão e, 56 e 79 para a cultura do milho, para o solo com e sem palha na superfície, respectivamente. Desta maneira, a estimativa da chuva efetiva pelo modelo SIMDualKc foi muito similar a observada a campo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 6, p. 136 - 141, 2002.

ALLEN, R. G., CLEMMENS, A. J., BURT, C. M., SOLOMON, K., O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 24 - 36, 2005.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, FAO, Rome, Italy, 1998. 300 p.

ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W. O.; PEREIRA, L. S.; JENSEN, M. E. Water requirements. In HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOT, R. L. (Eds.). Design and operation of farm irrigation systems (2nd ed.). (pp. 208-288) St. Joseph, MI: ASABE, 2007.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, 2001.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do número de curva (CN/SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, p. 264-279, 2012.

BANASIK, K., WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agrônômica**, vol. 36, n. 1, jan.-abr., p. 24 - 33, 2005.

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.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; FABIAN, E. L.; PEGORARO, R.; ZAVASCHI, E.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háplico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243 - 250, 2008.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; BERTOL, I.; ROLOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade do escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em área cultivada sob semeadura direta e submetida às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 781 - 792, 2007.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G., SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169 - 178, 2009.

CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774- 3789, 2011.

CARLESSO, R.; SPOHR, R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, n. 98, p. 1020 - 1026, 2011.

CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A.. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n. 7, p. 685 - 690, 2004.

CHEN, F.; LIU, C.; CHANG, F. Improvement of the agricultural effective rainfall for irrigating rice using the optimal clustering model of rainfall station network. **Paddy and Water Environment**, 2013.

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.

DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial de um solo com diferentes níveis de resíduos vegetais e declividades do terreno. 2010. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria.

DASTANE, N.G. **Effective rainfall and irrigated water requirements**. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p.

DASTANE, N.G. Effective rainfall and irrigated water requirements. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper 25. 1974. 68p fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 743 - 753, 2003.

DELAUNE, P.B.; SIJ, J.W. Impact of tillage on runoff in long term no-till wheat systems. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p.32–35, 2012.

DESHMUKH, D. S.; CHAUBE, U. C.; HAIULU, A. E; GUDETA, D. A.; KASSA, M.T. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology**. v 492.p 89 - 101, 2013.

DINIZ, L. S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for Predicting Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 1975. 179 p.

EBRAHIMIAN, M.; AINUDDIN, A.B.; SOOM, M. A. B. M.; SOOD, A. M.; NENG, L. J. Runoff Estimation in Steep Slope Watershed with Standard and Slope-Adjusted Curve Number Methods. **Journal of Environmental Studies**. Vol. 21, No. 5 1191-1202, 2012.

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

ENGEL, F. L.; BERTOL, I.; MAFRA, Á. L.; COGO, N. P. Water erosion under simulated rainfall in different soil management systems during soybean growth. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 2, p. 187 - 193, 2007.

GAO, Y.; ZHU, B.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. Z. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of Purple soil. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, v. 22, n. 11, p. 396–400, 2006.

GARCIA-RUIZ, J. M.; REGUÉS, D.; ALVERA, B.; LANA-RENAULT, N.; SERRANO-MUELA, P.; NADL-ROMERO, E.; NAVAS, A.; LATRON, J.; MARTÍ-BONO, C. ARNÁEZ, J. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. **Journal of Hydrology**, v.274, p.30-46, 2008.

GODINHO, P.; SEQUEIRA, B.; PAREDES, P.; P'EREIRA, L.S. Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos coeficientes culturais duais. Modelo SIMDualKc. In: Taller Internacional: Modernización de Riegos e Uso de Tecnologías de Información. La Paz, Bolivia, 2007. **Anais...** La Paz, Bolívia CD-ROM. 2007.

HUANG, J.; ZHAO, X.; WU, P. Surface runoff volumes from vegetated slopes during simulated rainfall events. **Journal of Soil and Water Conservation**. July/August vol. 68 no. 4 283-295, 2013.

HUANG, M.; GALLICHAND, J. 2; WANG, Z.; GOULET, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, 20, 579–589, 2006.

JACOBS, J. H., SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

JIN, H.; SUN, X. H.; LI, Y. B. Application of SCS model in Lanhe watersheds. **Journal Taiyuan University of Technology**, v. 34, n. 6, p. 735–736, 2003.

LIMA, H. M.; VARGAS, H. CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 3, p. 525 - 536, 2007.

LIU, Y.; TEIXEIRA, J. L.; ZHANG, H. J.; PEREIRA, L. S. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 36, p. 233 - 246, 1998.

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**, Campinas, v. 11, p. 71 - 75, 1987.

MEHL, H. U.; ELTZ, F. L. F.; REICHERT, J. M.; DIDONÉ, I. A. Caracterização de padrões de chuvas ocorrentes em Santa Maria (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 475 - 483, 2001.

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

MELO, G. L. Caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul. 95p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2006.

MISHRA, S. K. AND SINGH, V. P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, **The Netherlands**, ISBN 1-4020-1132-6, 2003.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P.; RANVIR SINGH. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 301 - 322, 2006.

NASTA, P.; KAMAI, T.; CHIRICO, G.B.; HOPMANS, J.W.; ROMANO, N. Scaling soil water retention functions using particle size distribution. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 223-234, 2009.

NRCS (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). **National Engineering Handbook**, Part 630 Hydrology, U.S. Department of Agriculture, 2009.

OLIVEIRA Z, B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A.E.; DALLA SANTA, C. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Revista Irriga**, v. 18, n. 3, p. 415 - 425, 2013.

OLIVEIRA, J. R.; PINTO, M. F.; SOUZA, W. J.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 140 - 147, 2010.

PACHEPSKYA, Y.A.; RAWLSB, W.J.; LINC H.S. Hydropedology and pedotransfer functions. **Geodrema**, v.11, p.308-316, 2006.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 261 - 268, 2006.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; BICCA, D. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1777 - 1786, 2011.

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: Universidade Federal de Viçosa, 1997.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2006. 88p.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; DEMETRIUS, D.D. **Escoamento superficial**. Ed. UFV, 2 ed, Viçosa-MG, 2008.

RAHMAN, M. M.; ISLAM, M. O; HASANUZZAMAN, M. Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh. **World Journal of Agricultural Sciences**. v.4; p. 453-457, 2008.

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

ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**, v. 103, p. 8 - 24, 2012.

SAMPAIO, S. C.; CORRÊA, M. M.; BÔAS, M. A. V.; OLIVEIRA, L. F. C. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 210 - 213, 2000.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; SRINIVASAN, V. S. Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 92 - 96, 2000.

SANTRA, P.; SANKAR, B.D. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. **Geoderma**, v.146, .439-448, 2008.

SAS - Statistical Analysis System, Institute Inc. **SAS-S - Guide**, Version 6.0. Cary, NC, 1997.

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

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

SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S. 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 - 1230, 2001.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S.; PAIVA, K. W. N. 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.

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

SOUZA, J. L, LOMBARDI NETO, F, TUBELIS, A. Estimativa e análise do escoamento superficial em solo descoberto e cultivado com a sucessão soja e trigo, sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 77-84, 1995.

SPOHR, R. B.; CARLESSO, R., GALLÁRRETA, C. G.; PRÉCHAC, F. G., PETILLO, M. G. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v. 39, n.1, 2009.

SRIWONGSITANON, N.; TAESOMBAT, W. Effects of land cover on runoff coefficient. **Journal of Hydrology**. v.410, p. 226–238. 2011,

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:327-338, 2000.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388–403, 2008.

WANG, Y.; HUANG, M. B. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau. **Bulletin Soil Water Conservation**, v. 28, n.1, p. 54–58, 2008.

ZHANG, M. H.; WANG, X. Y.; QIN, F. L. Application of SCS model to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County. **Journal of Capital Normal University** (Natural Science Edition), v. 25, n. 1, p. 155 - 158, 2004.