

EROSIVIDADE E CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DAS CHUVAS DE RIO GRANDE (RS)⁽¹⁾

Marcos Gabriel Peñalva Bazzano⁽²⁾, Flávio Luiz Foletto Eltz⁽³⁾ &
Elemar Antonino Cassol⁽⁴⁾

RESUMO

As características específicas das chuvas variam entre regiões, e o conhecimento da sua potencialidade em causar erosão é necessário para planejar atividades agrícolas e de engenharia civil. Para a localidade de Rio Grande (RS), foi determinada a erosividade e sua relação com a precipitação e o coeficiente de chuva, os padrões hidrológicos e o período de retorno das chuvas. Utilizaram-se dados pluviográficos de 23 anos de Rio Grande. Para cada chuva erosiva, foram separados os segmentos do pluviograma com a mesma intensidade e registrados os dados em planilha. Com o programa Choveros foram calculados a erosividade mensal, anual e média pelo índice EI_{30} no Sistema Internacional de Unidades e os padrões hidrológicos das chuvas. Os valores médios mensais da precipitação e do índice de erosividade foram expressos como percentagens do valor médio anual da precipitação e do índice de erosividade, respectivamente, a fim de obter a curva de distribuição acumulada da precipitação e do índice de erosividade em função do tempo. O coeficiente de chuva (R_c) foi calculado. Foram realizadas correlações de Pearson e regressões lineares simples entre o índice de erosividade EI_{30} e os valores médios anuais de precipitação e de coeficiente de chuva. O período de retorno foi calculado para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. O valor médio anual da erosividade das chuvas com base no índice EI_{30} para o Rio Grande foi de $5.135 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, valor que representa o Fator “R” da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE). As equações de regressão entre EI_{30} e precipitação e coeficiente de chuva não foram significativas. Em relação ao total das chuvas, 32,6 % do número e 99,3 % do volume foram erosivos. Do número total das chuvas erosivas, 45,6 % foram do padrão hidrológico avançado, 25,6 % do intermediário e

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Recebido para publicação em agosto de 2008 e aprovado em novembro de 2009.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, M.Sc., Asociación para la Agricultura Sostenible en base a Siembra Directa. La Paz 302, Col. Alameda, Caixa Postal 38050, Celaya, Guanajuato, México. E-mail: marcos.penalva@gmail.com

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima 1000, Camobi, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). CEP 97105-900 Santa Maria – RS. feltz@ccr.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor Associado do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul – UFRGS. CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: cassolea@orion.ufrgs.br

28,7 % do atrasado, ao passo que, do volume total das chuvas erosivas, 47,8 % foram do padrão avançado, 28,0 % do intermediário e 24,2 % do atrasado. Da erosividade anual, 49,1 % correspondeu a chuvas do padrão avançado, 28,9 % a chuvas do padrão intermediário e 22,1 % a chuvas do padrão atrasado. O método da distribuição extrema tipo I foi adequado para obter as curvas de intensidade-duração-frequência. Os períodos de retorno da chuva podem ser calculados por meio das equações, utilizando os valores dos parâmetros encontrados, ou pelos gráficos das curvas de intensidade-duração-frequência.

Termos de indexação: erosividade, coeficiente de chuva, padrões hidrológicos, período de retorno.

SUMMARY: *EROSIVITY AND HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF RAINFALLS IN RIO GRANDE (RS, BRAZIL)*

Specific rainfall characteristics vary among regions and their erosion potential must be known for the planning of agricultural and civil engineering activities. For Rio Grande (RS, Brazil), the erosivity and relationships with the precipitation and rainfall coefficient, rainfall hydrologic patterns and return period were determined based on rainfall data of 23 years. For each erosive rainfall the segments of the rainfall chart with the same intensity were separated together and the data registered in worksheets. The mean monthly and annual rainfall erosivity, the EI_{30} index in the International System of Units and the rainfall patterns were estimated using software Chuveros. The mean monthly values of precipitation and erosivity index were expressed as percentage of the mean annual values of these variables, resulting in the curve of accumulated distribution of precipitation and erosivity index in function of time. The rainfall coefficient (R_c) was calculated. Pearson correlations and linear regressions between the erosivity index EI_{30} and the mean annual values of precipitation and rainfall coefficient were calculated. The rainfall return period was calculated for 2, 5, 10, 20, 50, and 100 years. The mean annual value of EI_{30} was $5135 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, which is to be used as "R" Factor in the Universal Soil Loss Equation (USLE) for Rio Grande and surrounding regions with similar climatic conditions. The regression equations for EI_{30} and precipitation and rainfall coefficient were not significant. Regarding the total rainfalls studied, it was found that 32.6 % of the rainfalls and 99.3 % of the rain volume were erosive. From the total number of erosive rainfalls, 45.6 % had an advanced hydrologic pattern, 25.6 % an intermediary and 28.7 % a delayed pattern, while for the total volume of erosive rainfalls, 47.8 % had an advanced hydrologic pattern, 28.0 % an intermediary and 24.2 % a delayed pattern. In terms of annual erosivity, 49.1 % corresponded to rainfalls with an advanced, 28.9 % an intermediary and 22.1 % to a delayed pattern. The method of extreme distribution type I was adequate to obtain intensity-duration-frequency curves. Rainfall return periods can be calculated by the equations using the values of the parameters found, or by the graphs of intensity-duration-frequency.

Index terms: erosivity, rainfall coefficient, hydrological patterns, return period.

INTRODUÇÃO

Grande parte da erosão hídrica, provocada pelo impacto direto das gotas da chuva e, ou, pelo escoamento superficial do excesso de água da chuva (enxurrada), deve-se às características específicas das chuvas.

Em regiões de clima temperado, o índice EI_{30} (energia cinética da chuva, E , multiplicada pela intensidade máxima em 30 min, I_{30}) é o melhor estimador da erosividade da chuva (Wischmeier,

1959), sendo utilizado para estimar o valor do fator R da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE). Em regiões de clima tropical e subtropical onde o uso do índice EI_{30} não tem proporcionado os melhores resultados na estimativa de perdas de solo, foram desenvolvidos outros índices, como, por exemplo, o $KE > 25$ (Lal, 1976; Hudson, 1981).

Em razão das dificuldades na determinação do índice EI_{30} , vários autores (Lombardi Neto, 1977; Leprun, 1981; Carvalho, 1987; Morais et al., 1988b; Oliveira Junior & Medina, 1990; Bertol, 1994; Silva

& Dias, 2003; Moreti et al., 2003) procuraram facilitar a determinação do índice de erosividade, relacionando-o com o coeficiente de chuvas (Rc).

A partir de índices de erosividade de várias localidades de uma determinada região, pode-se estabelecer um mapa de linhas isoerodentes (Rufino et al., 1993; Lago, 2000), que poderá servir para o planejamento adequado de atividades que visem à conservação do solo. No Rio Grande do Sul, Morais et al. (1988a), Lago (2000), Cassol et al. (2004, 2008), Roncato et al. (2004), Cogo et al. (2006), Peñalva Bazzano et al. (2007) e Hickmann et al. (2008) determinaram o índice EI_{30} de várias localidades.

Em função da distribuição temporal das intensidades, as chuvas são classificadas em padrões hidrológicos avançado, intermediário e atrasado, se os picos de maior intensidade ocorrerem no início, no meio ou no fim do período de duração das chuvas, respectivamente (Horner & Jens, 1941). Os padrões de chuva podem mudar em distintas regiões e ter diferentes períodos de retorno (Mehl et al., 2001; Moreti et al., 2003).

Perdas de solo e danos em infraestrutura e obras de engenharia hidráulica ocorrem frequentemente por causa da chuva. Eficientes dimensionamentos de obras hidráulicas urbanas e terraços agrícolas podem-se realizar quando são considerados aspectos de risco e frequência da chuva. A análise de distribuição de frequência permite estimar o período de retorno de um evento extremo de chuva. Ele é definido como a probabilidade de que o referido evento possa ser igualado ou excedido, pelo menos uma vez, em média (Eltz et al., 1992). Denardin et al. (1980) propuseram para o cálculo da intensidade máxima (I) de 14 localidades do Rio Grande do Sul, inclusive Rio Grande, equações com duas variáveis independentes (T, período de retorno, e t, período de duração da chuva) e quatro coeficientes de ajuste (a, b, c e d), as quais tiveram altos coeficientes de determinação múltipla (R^2).

O objetivo deste trabalho foi determinar para a localidade de Rio Grande, do Estado do Rio Grande do Sul: (a) erosividade da chuva e sua relação com a precipitação e o coeficiente de chuva; (b) padrões hidrológicos da chuva; e (c) período de retorno da chuva.

MATERIAL E MÉTODOS

A partir de dados pluviográficos de 23 anos (período 1957-1981, com exceção de 1958 e 1979) da estação meteorológica da localidade de Rio Grande, do Estado do Rio Grande do Sul, cedidos pela FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária), foram calculados a erosividade da chuva, o coeficiente de chuva e sua relação com a erosividade e a relação da erosividade com a precipitação e determinados os padrões hidrológicos e os períodos de retorno das chuvas.

Rio Grande situa-se na região fisiográfica denominada Litoral. Sua estação meteorológica localiza-se a uma altitude de 15 m, com latitude sul de $32^{\circ} 01'$ e longitude oeste de $52^{\circ} 09'$. Segundo a classificação de Köppen, o clima é Cfa, ou seja, temperado úmido sem estiagem, com temperaturas média, máxima e mínima anual de 18,1, 21,8 e 15,0 °C, respectivamente, e precipitação média anual de 1.162 mm, considerando o período da normal climatológica de 1931-1960 (IPAGRO, 1989).

Conforme sugerido por Cabeda (1976), foram selecionadas as chuvas individuais erosivas, considerando-se chuvas individuais aquelas separadas de outras por um intervalo de no mínimo 6 h com precipitação inferior a 1 mm, e erosivas quando a precipitação total foi igual ou superior a 10 mm ou quando a precipitação foi igual ou superior a 6 mm, ocorrendo em 15 min ou menos.

A partir dos pluviogramas diários, cada chuva erosiva individual foi separada em segmentos uniformes (intensidade constante) e os dados registrados manualmente em planilha, onde foi anotada a hora em que houve variação de intensidade e a chuva acumulada até aquele momento. A amplitude de registro dos pluviogramas foi de 10 mm de precipitação, com resolução de 0,1 mm. O tempo de registro foi de 24 h, com escala de 10 min, realizando-se a leitura da precipitação com resolução de 5 min.

Utilizando o programa Choveros, elaborado por Elemar Antonino Cassol (DS-FA-UFRGS), e planilhas de cálculo Microsoft Office Excel, foi estimada a erosividade mensal, anual e média das chuvas pelo índice EI_{30} (Wischmeier & Smith, 1958), no Sistema Internacional de Unidades (Foster et al., 1981).

Os valores mensais dos índices de erosividade EI_{30} são a média dos meses para a localidade. O valor médio anual do índice de erosividade EI_{30} é a média dos anos do período estudado, sendo esse valor utilizado como Fator "R" na Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978).

Os valores médios mensais da precipitação e do índice de erosividade foram expressos como percentagens do valor médio anual da precipitação e do índice de erosividade, respectivamente, para obter a curva de distribuição acumulada da precipitação e do índice de erosividade em função do tempo, conforme Wischmeier & Smith (1958).

O coeficiente de chuva (Rc) foi calculado por meio da equação proposta por Lombardi Neto (1977):

$$Rc = p^2 P^{-1} \quad (1)$$

sendo p a precipitação média mensal (mm) e P a precipitação média anual (mm).

Foram realizadas análises de correlação de Pearson e de regressão linear simples entre o índice de erosividade EI_{30} e cada um dos valores médios anuais

de precipitação e coeficiente de chuva utilizando o programa estatístico SAS (Statistical Analysis System), versão 8.02 para Windows, com o apoio do manual para análises estatísticas de dados experimentais (Rebolledo R., 2002).

O padrão da chuva foi determinado pelo programa Chuveros, separando-se as chuvas de acordo com os padrões hidrológicos avançado, intermediário e atrasado da classificação proposta por Horner & Jens (1941). Também foi calculada a porcentagem do total das chuvas que representa cada padrão.

O período de retorno (T) foi determinado segundo o método descrito por Eltz et al. (1992). Por meio do programa Chuveros, calcularam-se os valores das quantidades máximas de chuva ocorridas durante 1/6, 1/3, 1/2, 1, 2 e 4 h, e a partir dos pluviogramas das chuvas de cada ano foram determinadas as quantidades máximas de chuva ocorridas durante 8, 12, 24 e 48 h em qualquer momento do período de tempo analisado. Nos intervalos menores (até 4 h), as durações de chuva consideradas podem representar um período mais curto que a duração total de uma chuva individual, enquanto as durações maiores (8 h ou mais) podem abranger mais de uma chuva individual e, também, um período com parte em um dia e parte em outro.

Os dados das intensidades máximas em cada duração de chuva foram testados pela distribuição extrema tipo I (Gumbel, 1958) com o programa Fregrisk, descrito em Kite (1988). Calcularam-se a média (μ), o desvio-padrão (σ), o parâmetro α (parâmetro de escala) e o período de retorno para 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Para cada período de retorno, foram ajustadas equações polinomiais de segunda ordem com a forma:

$$\log I = a + b(\log D) + c(\log D)^2 \quad (2)$$

em que \log é o logaritmo base 10; I é a intensidade máxima da chuva, em mm h^{-1} ; D é a duração da chuva, em h; e a , b e c são parâmetros de ajuste. Também foi ajustada a equação utilizada por Denardin et al. (1980), que relaciona as características intensidade da chuva, duração da chuva e período de retorno da chuva:

$$I = \frac{aT^b}{(t+c)^d} \quad (3)$$

em que I é a intensidade máxima da chuva, em mm h^{-1} ; T é o período de retorno, em anos; t é a duração da chuva, em min; e a , b , c e d são parâmetros de ajuste. O ajuste da equação (7) foi realizado por regressão múltipla linear após linearização com a forma:

$$\log I = \log a + b \log T - d \log (t + c) \quad (4)$$

em que \log é o logaritmo base 10. Em razão da associação com a variável independente t na equação (8), o parâmetro c não pode ser estimado. Assim, atribuíram-se valores arbitrários ao coeficiente c ,

estimando os coeficientes a , b e d para cada caso até encontrar a equação com maior coeficiente de determinação múltipla (R^2), considerada a de melhor ajuste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Erosividade da chuva (índice EI_{30}) e coeficiente de chuva (R_c)

Os valores mensais médios do índice de erosividade EI_{30} da chuva, com os respectivos intervalos de confiança, são mostrados na figura 1, onde pode ser observado que os maiores valores de erosividade ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro e os menores nos meses de abril, maio e junho. A variação nos valores mensais de precipitação e de características da chuva, como a intensidade, determina grandes variações na erosividade, o que acarreta intervalos de confiança elevados.

O valor do fator R da USLE para Rio Grande, valor médio anual da erosividade da chuva, é de $5.135 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Quadro 1). O valor de erosividade encontrado está próximo do valor da isoerodente mapeada perto dessa localidade no trabalho de Clérico & García Préchac (2001) para a região sul da bacia do Rio da Prata, que alcançou no ano $5.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, e discorda do valor da isoerodente de $3.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ encontrado por Lago (2000) para a mesma localidade.

Morais et al. (1991), estudando as localidades de Barranquinho e Flechas (MT), com precipitações médias anuais de 1.369 e 1.316 mm, respectivamente, similares às do presente trabalho (1.300,7 mm), encontraram valores médios anuais do índice EI_{30} de 8.493 e 7.830 $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ – maiores que o obtido para Rio Grande.

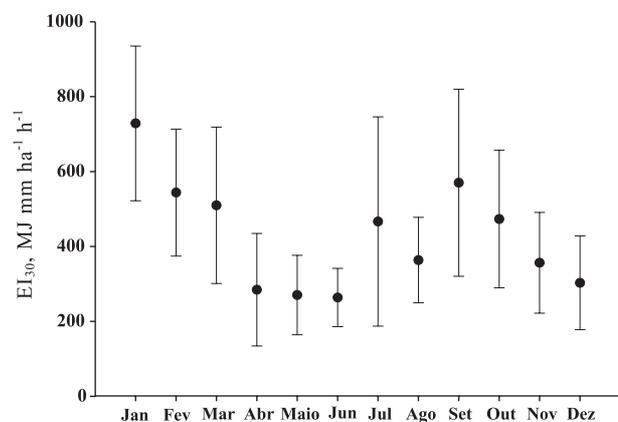


Figura 1. Distribuição média mensal do índice de erosividade (EI_{30}) em Rio Grande-RS, no período de 1957 a 1981, com intervalo de confiança de 95 %.

Wischmeier & Smith (1958) e Wischmeier (1959), nos Estados Unidos, e Lal (1976), na Nigéria, encontraram correlações significativas entre o índice EI_{30} e as perdas de solo. No Brasil, foram desenvolvidos trabalhos similares por Lombardi Neto (1977), no Estado de São Paulo; Biscaia et al. (1981), no Estado do Paraná; Morais et al. (1988a), em Guaíba, Ijuí e Santa Maria-RS; Carvalho et al. (1989), em Mococa-SP; Carvalho et al. (1993), em Campinas-SP; e Carvalho et al. (1997), em Pindorama-SP, encontrando-se em todos os casos correlações significativas entre o índice de erosividade EI_{30} e as perdas de solo.

No quadro 1 encontram-se a precipitação, o índice de erosividade e o coeficiente de chuva Rc médios mensais e anuais. Esses valores são relativamente mais bem distribuídos durante o ano do que em algumas outras localidades no mesmo Estado, como Santa Maria (Cogo et al., 2006), Quaraí (Peñalva Bazzano et al., 2007) e São Borja (Cassol et al., 2008). As distribuições mensais das características estudadas diminuem de janeiro a abril, aumentando depois, até julho e agosto, e tendem a decrescer até dezembro.

Observa-se que os maiores valores de precipitação e coeficiente de chuva ocorrem entre julho e setembro, e os menores, em abril-maio e novembro-dezembro, para precipitação e para coeficiente de chuva, respectivamente (Quadro 1). Essa distribuição difere quando comparada à distribuição dos valores da erosividade, que apresenta os valores máximos em janeiro, fevereiro e setembro e os mínimos em abril, maio, junho e dezembro, mostrando que a erosividade é dependente da intensidade da chuva.

Em caso de coincidir com práticas de preparo em que o solo fica descoberto, pode-se esperar alto risco de erosão nos períodos de janeiro-março, julho e setembro-

outubro (Quadro 1), quando se concentrou a maior proporção da erosividade anual. Para diminuir esses riscos, é necessário o planejamento adequado das práticas conservacionistas do solo, para não coincidir épocas de menor proteção do solo com os períodos de maior erosividade.

Nas análises de correlação de Pearson não foi encontrada correlação significativa do índice de erosividade EI_{30} com a precipitação nem com o coeficiente de chuva ($p < 0,05$). As regressões lineares obtidas não foram significativas. Assim, não é recomendável utilizar essas equações para determinar o índice EI_{30} por meio do uso de dados pluviométricos mensais e anuais (Escalante & Reyes, 2004).

Correlações significativas entre o índice EI_{30} e o coeficiente de chuva Rc foram observadas por outros autores em diferentes localidades, como os casos de oito regiões do Estado do Paraná (Rufino et al., 1993), Goiânia-GO (Silva et al., 1997) e Fortaleza-CE (Silva & Dias, 2003). Estes últimos autores também encontraram uma regressão significativa sob a forma de potência para as variáveis consideradas, da mesma forma que Lombardi Neto (1977) para Campinas-SP, Morais et al. (1991) para o sudoeste do Mato Grosso do Sul, Carvalho et al. (1997) para Selvíria-MS e Roque et al. (2001) para Piraju-SP.

Também não foram encontradas correlações significativas do índice EI_{30} com a precipitação e com o coeficiente de chuva Rc por Bertol (1994) para a localidade de Campos Novos-SC.

Padrões de chuva

No quadro 2 apresentam-se os valores médios anuais de número, volume e erosividade das chuvas erosivas e totais e a distribuição dos padrões hidrológicos das chuvas de Rio Grande. Observa-se que, do número total de chuvas erosivas, perto da metade foi classificada dentro do padrão avançado. Das chuvas restantes, aproximadamente uma quarta parte foi classificada no padrão intermediário e uma proporção pouco maior no padrão atrasado. Em relação ao número total de chuvas anuais, as chuvas erosivas representam quase um terço. Quase a metade do volume das chuvas erosivas correspondeu a chuvas do padrão avançado; o restante dividiu-se entre padrão intermediário e padrão atrasado, enquanto o volume das chuvas erosivas representa praticamente a totalidade do volume total anual de chuvas. Da erosividade total, praticamente a metade foi encontrada nas chuvas classificadas no padrão avançado, ao passo que as chuvas do padrão intermediário tiveram um pouco mais de erosividade do que as do padrão atrasado.

A distribuição das chuvas concentrada no padrão avançado (Quadro 2) permite esperar menores perdas de solo, pelo fato de que, no momento do pico da chuva, o solo estaria menos úmido que no caso dos outros padrões; dessa forma, a desagregação, o selamento e o transporte de solo seriam menores (Mehl et al., 2001).

Quadro 1. Valores médios mensais e anuais de precipitação pluvial (P), índice de erosividade EI_{30} e coeficiente de chuva (Rc) de Rio Grande-RS, no período de 1957 a 1981 (n=23)

Mês	Total mensal		
	P	EI_{30}	Rc
	mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹	mm
Jan	115,6	728,6	10,3
Fev	93,8	543,9	6,8
Mar	109,7	510,0	9,3
Abr	73,6	284,7	4,2
Mai	86,9	270,4	5,8
Jun	110,6	263,8	9,4
Jul	149,0	466,8	17,1
Ago	143,0	363,8	15,7
Set	138,8	570,2	14,8
Out	117,0	473,3	10,5
Nov	85,8	356,5	5,7
Dez	76,9	303,1	4,5
Total anual	1.300,7	5.135,0	-

Quadro 2. Valores médios anuais do número, volume e erosividade das chuvas erosivas e totais (erosivas e não erosivas) e distribuição por padrão das chuvas erosivas na localidade de Rio Grande, no período de 1957 a 1981

Variável	Unidade	Chuva erosiva				Total das chuvas (erosivas e não erosivas)
		Avançado	Intermediário	Atrasado	Total	
Número	-	16,6	9,3	10,4	36,3	111,5
	% das chuvas erosivas	45,6	25,6	28,7	100,0	
	% do total das chuvas	14,9	8,3	9,4	32,6	100,0
Volume	mm	617,1	362,3	312,7	1.292,1	1.300,7
	% das chuvas erosivas	47,8	28,0	24,2	100,0	
	% do total das chuvas	47,4	27,9	24,0	99,3	100,0
Erosividade (Índice EI ₃₀)	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹	2.519,8	1481,9	1.133,4	5.135,0	5.135,0
	%	49,0	28,9	22,1	100,0	100,0

Eltz et al. (2001), trabalhando com simulador de chuva em um Argissolo Vermelho-Amarelo, observaram maior perda de solo em chuvas de padrão atrasado em relação às perdas de solo das chuvas de padrão intermediário e avançado, entre as quais não houve diferenças significativas, o que foi explicado pelas condições de alteração da superfície e umidade do solo no decorrer da chuva. No padrão atrasado, quando ocorre o pico de máxima intensidade, o solo está com maior umidade (em relação aos outros padrões), favorecendo a desagregação, o selamento superficial e o transporte das partículas de solo, ocorrendo assim maiores perdas.

Período de retorno

Observou-se precipitação máxima para diferentes durações de chuva (Quadro 3). Para as durações menores, há tendência de que os valores de precipitação máxima repitam-se em vários anos. À medida que a duração da chuva aumenta, diminui o número de anos em que esse valor se repete.

Em função do método empregado para obter os dados de precipitação máxima para as diferentes durações da chuva, os valores aqui apresentados poderiam diferir dos obtidos por IPAGRO (1989), o qual considera a quantidade de chuva em um período fixo de tempo, ou seja, 24 h para valores tanto de pluviômetro quanto do pluviógrafo. No presente trabalho, foi considerada a precipitação máxima para a duração estabelecida em qualquer período de tempo, ou seja, foi considerada a data do início de uma chuva erosiva individual, independentemente de quantos dias possa ter durado.

No quadro 4 são apresentados os valores de intensidade média, desvio-padrão e parâmetro α para diferentes durações da chuva, calculados mediante o programa Freqrisk (Kite, 1988). Aplicam-se esses valores nas equações (Bedient & Huber, 1988):

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}}, -\infty \leq x \leq \infty \quad (5)$$

sendo F uma função de densidade probabilística; e , base neperiana; α , um parâmetro de escala; e u (modal), um parâmetro de localização. Esses parâmetros se relacionam com a média (μ) e o desvio-padrão (σ) por:

$$u = \mu - 0,5772\alpha^{-1} \quad (6)$$

e

$$\alpha = \pi(\sigma \sqrt{6})^{-1} \quad (7)$$

O valor da intensidade máxima esperada para determinado período de retorno e duração da chuva é dado por:

$$I = \mu + K\sigma \quad (8)$$

sendo K o fator de frequência, que é calculado por:

$$K = -0,7797\{0,5772 + \ln[\ln(T(T-1)^{-1})]\} \quad (9)$$

sendo \ln o logaritmo neperiano.

O período de retorno, T , desejado é calculado pela equação:

$$T = 1/(1 - F) \quad (10)$$

Assim, é possível calcular o período de retorno para uma determinada intensidade e duração da chuva.

A intensidade da chuva para as durações e os períodos de retorno utilizados neste trabalho, analisados pela distribuição extrema tipo I (Gumbel, 1958), é apresentada no quadro 5. Os parâmetros das regressões (a , b e c) entre o log da intensidade e o log da duração da chuva podem ser observados no quadro 6. Os resultados mostram altos coeficientes de determinação para as regressões dos períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos, intermediários para as regressões dos períodos de retorno de 20 e 50 anos e relativamente baixos para o período de retorno de

Quadro 3. Precipitação máxima (mm) para diferentes durações de chuva em Rio Grande-RS, no período de 1957 a 1981, com respectivas medidas estatísticas de dispersão

Ano	Duração da chuva (h)									
	1/6	1/3	1/2	1	2	4	8	12	24	48
1957	10,0	14,9	15,9	19,4	29,6	37,2	54,5	74,1	92,6	92,6
1959	14,0	20,0	30,0	45,9	46,2	62,4	92,6	110,4	121,7	127,9
1960	10,0	20,0	30,0	55,0	72,6	74,8	81,8	88,1	88,1	88,1
1961	10,0	20,0	27,1	32,9	39,0	44,0	44,5	52,2	52,2	52,2
1962	10,0	12,3	14,6	15,9	24,2	40,0	64,1	68,0	78,3	78,3
1963	10,0	20,0	30,0	32,5	43,0	46,0	72,9	89,7	99,2	101,0
1964	10,0	20,0	30,0	60,0	82,6	100,8	122,6	123,6	126,5	141,3
1965	10,0	15,5	20,0	29,0	32,0	36,8	59,9	67,2	73,3	132,2
1966	10,0	20,0	30,0	60,0	111,6	132,0	139,8	141,1	148,7	151,3
1967	10,0	20,0	30,0	42,1	42,6	60,4	75,0	81,9	87,0	92,5
1968	10,0	20,0	30,0	50,0	50,8	58,8	60,0	60,0	73,0	91,8
1969	10,0	20,0	22,2	30,5	34,2	40,4	64,8	67,3	93,0	115,0
1970	10,0	20,0	30,0	32,1	48,0	64,0	70,7	79,4	104,0	104,0
1971	10,0	20,0	30,0	60,0	110,0	129,2	145,8	148,0	148,0	148,0
1972	10,0	20,0	30,0	37,5	43,4	47,2	61,9	63,3	69,1	93,6
1973	10,0	12,2	14,5	20,3	26,0	38,4	60,6	67,5	101,6	102,1
1974	10,0	20,0	25,0	33,8	43,8	51,2	68,5	72,7	109,6	109,6
1975	10,0	20,0	29,3	41,7	60,0	99,6	121,4	138,8	143,8	143,8
1976	10,0	20,0	23,9	32,2	45,8	58,8	64,5	84,2	114,8	125,0
1977	10,0	20,0	30,0	36,8	51,8	70,4	78,6	91,8	136,3	152,3
1978	10,0	20,0	27,7	37,7	45,0	63,2	57,9	80,9	83,5	120,7
1980	10,0	20,0	30,0	39,6	43,4	48,4	60,8	77,1	96,4	141,6
1981	10,0	20,0	30,0	58,7	59,2	59,2	59,3	59,3	59,3	59,3
Média	10,2	18,9	26,5	39,3	51,5	63,6	77,5	86,4	100,0	111,5
Máx ⁽¹⁾	14,0	20,0	30,0	60,0	111,6	132,0	145,8	148,0	148,0	152,3
Mín ⁽²⁾	10,0	12,2	14,5	15,9	24,2	36,8	44,5	52,2	52,2	52,2
DP ⁽³⁾	0,8	2,5	5,4	13,1	23,1	27,3	27,9	27,5	27,7	28,6
CV (%)	8,2	13,3	20,3	33,5	44,9	42,9	36,1	31,8	27,7	25,6

Máx.: valor máximo da série. Mín.: valor mínimo da série. D.P.: desvio-padrão. CV: coeficiente de variação.

Quadro 4. Valores de intensidade média (μ), desvio-padrão (σ) e parâmetro α para diferentes durações da chuva em Rio Grande-RS

Duração	μ	σ	α
h	mm h ⁻¹		
1/6	10,07	5,42	0,2372
1/3	17,92	3,21	0,4008
1/2	25,96	14,58	0,0881
1	37,71	22,35	0,0575
2	48,51	29,29	0,0439
4	60,06	35,92	0,0358
8	74,05	42,85	0,0300
12	83,10	47,61	0,0270
24	96,82	55,36	0,0232
48	108,30	61,89	0,0208

100 anos, sendo menor a confiabilidade no uso desses parâmetros. Eltz et al. (1992) tiveram resultados significativos para a localidade de Santa Maria-RS.

Quadro 5. Intensidade máxima da chuva calculada pelo método da distribuição extrema tipo 1 (Gumbel, 1958), para durações e períodos de retorno selecionados em Rio Grande-RS

Duração	Período de retorno (anos)					
	2	5	10	20	50	100
h	mm h ⁻¹					
1/2	47,1	72,8	89,9	106,2	127,4	143,2
1	34,0	53,7	66,8	79,3	95,5	107,7
2	21,8	34,8	43,3	51,5	62,2	70,1
4	13,5	21,5	26,7	31,7	38,2	43,1
8	8,4	13,1	16,2	19,2	23,1	26,0
12	6,3	9,8	12,1	14,3	17,2	19,3
24	3,7	5,7	7,0	8,3	10,0	11,3
48	2,0	3,2	3,9	4,7	5,6	6,3

As curvas que geraram os coeficientes das equações anteriormente numeradas estão representadas na figura 2. Com o uso dessa figura, é possível estimar diretamente a intensidade, a duração e o período de

Quadro 6. Parâmetros das regressões (a, b e c) entre log da intensidade da chuva (I), em mm h⁻¹, e log da duração da chuva (D), em horas, para os períodos de retorno (T) estudados e respectivos coeficientes de determinação (R²) e de variação (CV), em Rio Grande-RS

T	log I = a + b(log D) + c(log D) ²				
	a	b	c	R ²	CV
Ano					%
2	1,503	-0,488	-0,141	0,996 ⁽¹⁾	3,07
5	1,665	-0,420	-0,170	0,981 ⁽¹⁾	5,63
10	1,739	-0,384	-0,185	0,950 ⁽¹⁾	8,48
20	1,795	-0,352	-0,198	0,908 ⁽²⁾	11,00
50	1,854	-0,312	-0,214	0,834 ⁽³⁾	14,15
100	1,859	-0,235	-0,243	0,650 ⁽⁴⁾	21,16

⁽¹⁾, ⁽²⁾, ⁽³⁾ e ⁽⁴⁾: Significativos a 0,01; 0,02; 0,19; e 2,54 %, respectivamente.

retorno da chuva. Considerando uma duração e um período de retorno específico, pode-se determinar a intensidade da chuva para essas condições. De forma similar, partindo de dados de duração e intensidade, chega-se ao período de retorno, e com os valores de intensidade e período de retorno pode-se encontrar a duração da chuva. Dentro das amplitudes de duração, intensidade e períodos de retorno apresentados neste estudo, podem ser feitas interpolações. Para extrapolações fora desses limites, a confiabilidade é menor. Pelo fato de que a origem de dados corresponde a uma quantidade de anos limitada (23 anos), os eventos pluviais máximos reais podem ser maiores do que os observados.

A equação ajustada que relaciona as características intensidade (I, em mm h⁻¹), duração (t, em h) e período de retorno (T, em anos) da chuva:

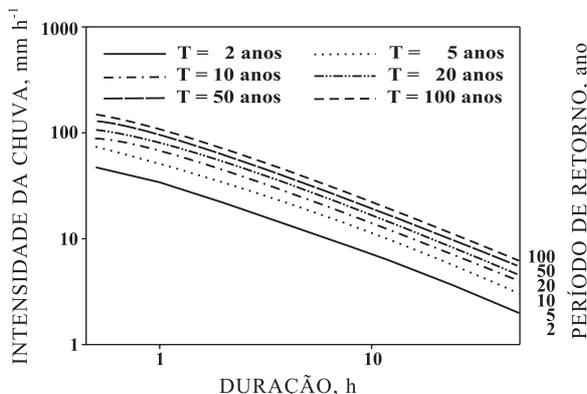


Figura 2. Períodos de retorno esperados (T), em anos, das chuvas em Rio Grande-RS, em função da sua intensidade e duração.

$$I = \frac{44,29 T^{0,28}}{(t + 0,52)^{0,81}} \tag{11}$$

teve alta significância estatística (probabilidade menor que 0,01 %), alto coeficiente de determinação e baixo coeficiente de variação. Os valores da intensidade da chuva para durações e períodos de retorno selecionados calculados pela equação 11 são mostrados no quadro 7. Os valores são similares aos obtidos no quadro 5, indicando que se pode utilizar qualquer uma das equações apresentadas.

As informações que proporcionam as análises de frequência apresentadas nos gráficos de intensidade-duração-frequência (Figura 2) e a equação 11 poderão ser levadas em consideração para o dimensionamento de obras de conservação de solo, como canais de escoamento e espaçamento entre terraços, assim como diferentes obras civis. O dimensionamento mais ajustado ou superestimado de uma determinada obra implica respectivamente menor ou maior segurança da obra para resistir aos eventos pluviais, sendo as últimas mais onerosas. Assim, um planejamento eficaz deverá levar em consideração esses aspectos.

Quadro 7. Intensidade da chuva calculada pela equação $I = \frac{44,29 T^{0,28}}{(t + 0,52)^{0,81}}$ para durações e períodos de retorno selecionados, em Rio Grande-RS

Duração	Período de retorno (anos)					
	2	5	10	20	50	100
h	mm h ⁻¹					
1/2	52,9	68,3	82,9	100,6	130,0	157,8
1	38,3	49,5	60,1	72,9	94,2	114,3
2	25,5	32,9	39,9	48,5	62,6	76,0
4	15,9	20,5	24,9	30,2	39,0	47,4
8	9,5	12,3	14,9	18,1	23,4	28,4
12	7,7	9,0	10,9	13,3	17,1	20,8
24	4,0	5,2	6,3	7,7	10,0	12,1
48	2,3	3,0	3,7	4,4	5,7	7,0

CONCLUSÕES

1. O valor do fator R da equação universal de perdas de solo (USLE) para a localidade de Rio Grande é de 5135 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

2. Não foi encontrada correlação linear significativa do índice de erosividade EI₃₀ com a precipitação nem com o coeficiente de chuva. O padrão de chuva de maior ocorrência em Rio Grande RS é o avançado, seguido do atrasado e intermediário. O volume de chuvas e a erosividade (EI₃₀) corresponderam, em sua maioria, a chuvas classificadas no padrão avançado, seguido do intermediário e atrasado.

3. Em relação ao total das chuvas estudadas, 32,6 % do número e 99,3 % do volume foram erosivas.

4. Do número total das chuvas erosivas, 45,6 % foram do padrão hidrológico avançado, 25,6 % do intermediário e 28,7 % do atrasado, ao passo que, do volume total das chuvas erosivas, 47,8 % foram do padrão avançado, 28,0 % do intermediário e 24,2 % do atrasado. Quanto à erosividade, 49,0 % do total correspondeu a chuvas do padrão avançado, 28,9 % a chuvas do padrão intermediário e 22,1 % a chuvas do padrão atrasado.

5. O método da distribuição extrema tipo I foi adequado para obter as curvas de intensidade-duração-frequência.

6. Os períodos de retorno da chuva em Rio Grande podem ser calculados por meio das equações afins, utilizando os valores dos parâmetros encontrados, ou pelos gráficos das curvas de intensidade-duração-frequência.

7. As intensidades médias máximas das chuvas podem ser calculadas para os diferentes períodos de retorno e durações da chuva.

AGRADECIMENTOS

À FEPAGRO, pela cessão dos dados, e aos observadores meteorológicos da FEPAGRO, que com seu trabalho diário possibilitaram a obtenção dos pluviogramas.

LITERATURA CITADA

- BEDIANT, P.B. & HUBER, W.C. Hydrology and food plain analysis. New York, Addison Wesley, 1988. 650p.
- BERTOL, I. Avaliação da erosividade da chuva na localidade de Campos Novos (SC) no período de 1981-1990. *Pesq. Agropec. Bras.*, 29:1453-1458, 1994.
- BISCAIA, R.C.M.; RUFINO, R.L. & HENKLAIN, J.C. Cálculo de erodibilidade (fator K) de dois solos do Estado do Paraná. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:183-186, 1981.
- CABEDA, M.S.V. Computation of storm EI values. West Lafayette, Purdue University, 1976. 6p. (Não Publicado)
- CARVALHO, M.P. Erosividade da chuva: Distribuição e correlação com as perdas de solo de Mococa (SP). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1987. 104p. (Tese de Mestrado)
- CARVALHO, M.P.; CATANEO, A. & LOMBARDI NETO, F. Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Podzólico Vermelho-Amarelo de Pindorama. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:279-286, 1997.
- CARVALHO, M.P.; CATANEO, A. & LOMBARDI NETO, F. Índices de erosividade da chuva e enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Roxo distrófico de Campinas (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 17:445-450, 1993.
- CARVALHO, M.P.; LOMBARDI NETO, F.; VASQUES FILHO, J. & CATANEO, A. Erosividade da chuva de Mococa (SP) analisada pelo Índice EI₃₀. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:243-249, 1989.
- CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; MARTINS, D.; LEMOS, A.M.; LIMA, V.S. & BUENO, A.C. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1239-1251, 2008.
- CASSOL, E.A.; MARTINS, D.; ELTZ, F.L.F. & FALLEIRO, R.M. Erosividade das chuvas em Taquari, RS, determinada pelo índice EI₃₀, no período de 1963 a 1999. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA; MANEJO: INTEGRANDO A CIÊNCIA DO SOLO NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS, 15., Santa Maria, 2004. Resumos expandidos. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.
- CLÉRICI, C. & GARCIA PRECHAC, F. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata *Miscelánea. Agrociência*, 5:92-103, 2001.
- COGO, C.M.; ELTZ, F.L.F. & CASSOL, E.A. Erosividade das chuvas de Santa Maria, RS, determinada pelo índice EI₃₀. *R. Bras. Agrometeorol.*, 14:1-11, 2006.
- DENARDIN, J.E.; FREITAS, P.L.; WÜNSCHE, W.A. & WENDT, W. Características fundamentais da chuva no Brasil. I. Rio Grande do Sul. *Pesq. Agropec. Bras.*, 15:419-421, 1980.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:485-493, 2001.
- ELTZ, F.L.F.; REICHERT, J.M. & CASSOL, E.A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria, RS. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:265-269, 1992.
- ESCALANTE, C.A. & REYES, L. Influencia del tamaño de muestra en la estimación del factor de lluvia R. *Inf. Tecnol.* [online]. 15:105-110, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000400015&Ing=es&nrm=iso> Acesso em: 19 abril de 2005.
- FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G. & MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI units. *J. Soil Water Conserv.*, 36:355-359, 1981.
- GUMBEL, E.J. Statistics of extremes. New York, Columbia University Press, 1958. 375p.
- HICKMANN, C.; ELTZ, F.L.F.; CASSOL, E.A. & COGO, C.M. Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice EI₃₀, com base no período de 1963 a 1991. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:825-831, 2008.

- HORNER, W.W. & JENS, S.W. Surface runoff determination from rainfall without using coefficients. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 107:1039-1117, 1941.
- HUDSON, N.W. *Soil conservation*. 2.ed. New York, Cornell University Press, 1981. 324p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS AGRONÔMICAS - IPAGRO. Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 1989. v.1. 102p.
- KITE, G.W. *Frequency and risk analysis in hydrology*. Littleton, Water Resources Publications, 1988. 257p.
- LAL, R. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria, III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16:389-401, 1976.
- LAGO, J.C. Erosividade das chuvas na metade sul do Rio Grande do Sul. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 2000. 123p. (Tese de Doutorado)
- LEPRUN, J.C. A erosão, a conservação e o manejo do solo do Nordeste brasileiro: Balanço diagnóstico e novas linhas de pesquisa. Recife, SUDENE/ORSTOM, 1981. 107p.
- LOMBARDI NETO, F. Rainfall erosivity – Its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brasil. West Lafayette, Purdue University, 1977. 53p. (Tese de Mestrado)
- MEHL, H.U.; ELTZ, F.L.F.; REICHERT, J.M. & DIDONÈ, I.A. Caracterização de padrões de chuvas ocorrentes em Santa Maria (RS). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:475-483, 2001.
- MORAIS, L.F.B.; MUTTI, L.S.M. & ELTZ, F.L.F. Índices de erosividade correlacionados com perdas de solo no Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:281-284, 1988a.
- MORAIS, L.F.B.; MUTTI, L.S.M. & ELTZ, F.L.F. Relações entre características físicas da chuva e perdas de solo no Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:285-288, 1988b.
- MORAIS, L.F.B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, T.M.C.; HARDOIN, P.C.; ALMEIDA, J.E.L.; WEBER, O.L.S.; BOEL, E. & DURIGON, E. Índice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste do Mato Grosso. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:339-344, 1991.
- MORETI, D.; CARVALHO, M.P.; MANNIGEL, A.R. & MEDEIROS, L.R. Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:713-725, 2003.
- OLIVEIRA JÚNIOR, R.C. & MEDINA, B.F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). *R. Bras. Ci. Solo*, 14:235-239, 1990.
- PEÑALVA BAZZANO, M.G.; ELTZ, F.L.F. & CASSOL, E.A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1205-1217, 2007.
- REBOLLEDO R., H.H. *Manual SAS por computadora: Análisis estadístico de datos experimentales*. México, Trillas, 2002. 208p.
- ROQUE, C.G.; CARVALHO, M.P. & PRADO, R.M. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): Distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:147-156, 2001.
- RONCATO, M.L.; ELTZ, F.L.F.; GRAMINHO, D.H.; STEFANELO, C.; FIGUEIREDO, J.V. & PEDROSO, R.F. Erosividade mensal das chuvas de Santa Maria de abril 1996 a março de 2004. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA; MANEJO: INTEGRANDO A CIÊNCIA DO SOLO NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS, 15., Santa Maria, 2004. Resumos expandidos. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.
- RUFINO, R.L.; BISCAIA, R.C.M. & MERTEN, G.H. Determinação do potencial erosivo da chuva do Estado do Paraná através de pluviometria: Terceira aproximação. *R. Bras. Ci. Solo*, 17:439-444, 1993.
- SILVA, J.R.C. & DIAS, A.S. A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE). II - Correlação com o coeficiente de chuva e atualização do fator R no período de 1962 a 2000. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:347-354, 2003.
- SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P. & CURI, N. Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO. *Pesq. Agropec. Bras.*, 32:515-521, 1997.
- WISCHMEIER, W.H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23:246-249, 1959.
- WISCHMEIER, W.H. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.*, 31:5-9, 1976.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, USDA-Agricultural Research, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537)
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39:285-291, 1958.