

EFEITO DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL E DO USO E MANEJO DO SOLO SOBRE O ESCOAMENTO SUPERFICIAL E O APORTE DE SEDIMENTO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO DISTRITO FEDERAL⁽¹⁾

Henrique Marinho Leite Chaves⁽²⁾ & Leonardo Peres Piau⁽³⁾

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da variabilidade da precipitação sobre o escoamento direto e sobre o aporte de sedimento na bacia do rio Pípiripau ($A = 235 \text{ km}^2$), no Distrito Federal. Cinco anos típicos da série de precipitação foram selecionados: o ano mais úmido, o ano mais seco, o ano médio e dois anos que representaram os desvios-padrão da série (médio-seco e médio-úmido). Depois de o modelo ser calibrado com dados diários de chuva e vazão da bacia, simulações foram realizadas para cada evento chuvoso de cada um dos cinco anos selecionados da série, e o escoamento direto e o aporte de sedimento da bacia foram calculados com a MUSLE em três diferentes cenários de uso e manejo do solo: o cenário atual, onde predomina o preparo convencional do solo (PC) nas áreas de agricultura da bacia; o passado recente, em que predominava o Cerrado nativo (CER); e o cenário de plantio direto (PD), nas áreas de agricultura da bacia. Apesar de as vazões médias anuais observadas terem apresentado relação linear com os volumes de precipitação pluvial anual, em todos os cenários, o escoamento direto e o aporte de sedimento apresentaram aumento exponencial com o aumento da precipitação pluvial anual, sendo esse mais pronunciado na condição de preparo convencional (PC) do que nos outros cenários estudados (CER e PD). O aumento observado pode ser explicado pela não-linearidade do modelo MUSLE ao volume de precipitação e ao volume de escoamento.

Termos de indexação: variabilidade de precipitação, escoamento superficial, sedimentação, MUSLE.

⁽¹⁾ Trabalho apresentado no VII Encontro Nacional sobre Engenharia de Sedimentos, Porto Alegre, 2006. Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em setembro de 2007.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB. Caixa Postal 04357 CEP 70.910-900 Brasília (DF). E-mail: hlchaves@terra.com.br

⁽³⁾ Especialista em Recursos Hídricos - Agência Nacional de Águas - ANA-SPS. Quadra 5, Lote 3, Bloco L, CEP 70910-900 Brasília (DF).

SUMMARY: *EFFECT OF RAINFALL VARIABILITY AND LAND USE ON RUNOFF AND SEDIMENT IN THE PIPIRIPAU RIVER BASIN, IN THE DISTRITO FEDERAL, BRAZIL*

The objective of this study was to evaluate the effect of the rainfall variability on the runoff and sediment amount in the Pípiripau river basin ($A = 235 \text{ km}^2$), in the Distrito Federal, Brazil. To represent the climatic variability of the historic precipitation series, 5 years were selected: the moistest, the driest, an average, and 2 years representing the standard deviations from the series (half-wet and half-dry). After the calibration of the model with basin rainfall and runoff data, each rainfall event was simulated in each one of the selected years, and sediment yields were computed using software MUSLE for three different land-use and management situations: (a) The present conditions, with predominantly conventional agriculture in the agricultural areas (PC); (b) The former scenario, where native (Cerrado) vegetation existed in the basin (CER); and (c) no-till in the agricultural areas (PD). Although the relationship of the mean annual flow rates with the annual rainfall volume was linear, there was an exponential increase in runoff volume and sediment yield with precipitation in all scenarios; the most significant increases were observed for PC, followed by PD and CER. The exponential increase can be explained by the non-linearity of the MUSLE model regarding both precipitation and runoff volume.

Index terms: MUSLE, precipitation variability, sediment yield, surface runoff.

INTRODUÇÃO

Mudanças e variabilidades climáticas ameaçam a disponibilidade de água de muitas regiões do mundo, afetando não apenas o abastecimento doméstico e industrial de água, a irrigação e a geração hidroelétrica, como também a segurança e a qualidade dos ambientes naturais e urbanos, por meio do aumento de cheias, secas e da erosão, com conseqüente decréscimo da qualidade da água e da diversidade dos ecossistemas (Wagner & Franks, 2005). Apesar disso, a extensão e a frequência dos impactos globais em escalas regionais são pouco conhecidas, e seus efeitos podem variar em função das características hidrológicas e socioeconômicas locais (Walling, 1999).

Apesar de impactos hidrológicos de cenários de mudanças climáticas globais terem sido regionalizados no passado (p.ex., pelo acoplamento de modelos climáticos globais a modelos hidrológicos), os resultados dependem do tipo de modelo usado e da região estudada, gerando grande incerteza nas predições. Nesse sentido, estudos de volumes de escoamento anual para o Cerrado brasileiro, em função dos cenários do IPCC, variam de +50 até -150 mm ano⁻¹, relativamente aos valores históricos, dependendo do modelo climático usado (IPCC, 2001). Além disso, esse tipo de regionalização requer uma longa série de dados da variável de interesse, o que limita sua aplicação a bacias monitoradas (Wagner & Franks, 2005).

Sobrepondo-se às mudanças climáticas, de caráter mais global, há os efeitos das variabilidades climáticas regionais sobre as variáveis hidrológicas e sedimentológicas, bem como os impactos da mudança do uso e manejo do solo. No que diz respeito ao escoamento, estudos mostram significativa amplificação em relação a aumentos de precipitação (Tucci, 2003; Barros et al., 2005). Em termos do efeito das mudanças climáticas sobre a erosão e sedimentação, estas podem ser afetadas diretamente, por meio de mudanças na precipitação, e indiretamente, pelo efeito das flutuações climáticas sobre a cobertura vegetal (D'Odorico et al., 2000). Williams et al. (2001), estudando os possíveis efeitos das mudanças climáticas globais sobre a erosão em uma fazenda típica do Meio-Oeste americano, concluíram que os aumentos de temperatura e de precipitação previstos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) causariam aumento de erosão de 54 e 33 %, para o preparo convencional e o plantio direto, respectivamente, comparativamente às condições climáticas atuais.

Os impactos da mudança do uso e manejo do solo sobre as variáveis hidrológicas são um pouco mais conhecidos. Há evidências de que o aumento da cobertura vegetal reduz as vazões (Diaz & Querner, 2005) e que o tipo de manejo do solo pode afetar o escoamento e o aporte de sedimento em bacias (Walling, 1999; Zhang et al., 2004). Uma situação ainda mais complexa é o caso (frequente) da sobreposição dos efeitos da variabilidade climática aos de mudança do uso e manejo da terra, de difícil separação, particularmente em grandes bacias (Tucci, 2003; Querner et al., 2005).

Considerando os aspectos mencionados, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar o efeito da variabilidade climática, em termos da precipitação pluviométrica anual, e da mudança do uso e manejo da terra sobre o escoamento direto e sobre o aporte de sedimento na bacia do rio Pípiripau, no Distrito Federal, por meio de modelagem hidrossedimentológica.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da bacia do rio Pípiripau

A bacia escolhida para o estudo foi a do rio Pípiripau, de 235 km² de área. Ela está situada na região nordeste do Distrito Federal, com seu terço superior situado no Estado de Goiás. Com altitude de 1.050 m, a bacia apresenta declividade média de 5,8 cm m⁻¹ e solos bem drenados (CAESB, 2000).

Nos últimos 40 anos, com a colonização de Brasília, boa parte da cobertura vegetal natural da bacia deu lugar à agricultura intensiva e à pecuária extensiva, as quais cobrem hoje 43 e 28 % da bacia, respectivamente, restando 29 % de Cerrado e mata nativos (Figura 1). As propriedades na bacia variam entre 50 e 500 ha.

O rio Pípiripau abastece a cidade de Planaltina (150.000 habitantes), bem como um projeto de irrigação de hortaliças e frutas, gerando freqüentes disputas pelo uso da água durante o período de estiagem (maio-outubro). No caso do abastecimento doméstico, a concessionária de água local dispõe de uma barragem de captação a fio d'água, que, em razão do processo acelerado de sedimentação, tem de ser freqüentemente desassoreada, através da abertura de uma comporta de fundo (CAESB, comunicação pessoal).

Uso do solo

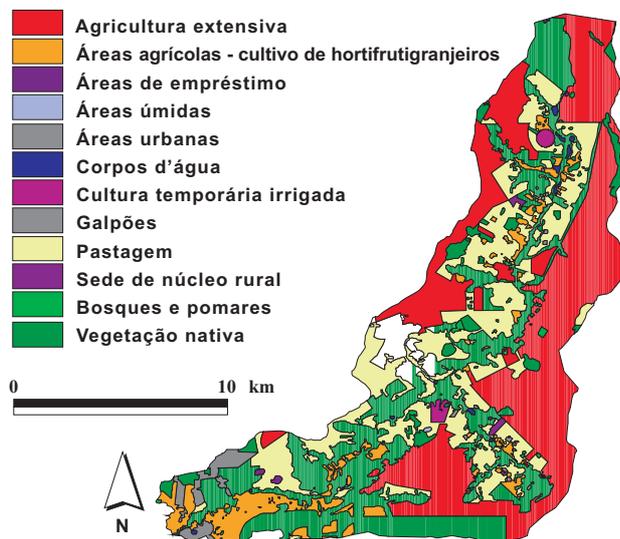


Figura 1. Uso do solo na bacia do rio Pípiripau. As coordenadas UTM nas extremidades da bacia são de 8.289.876 e 8.264.635 (N-S) e 235.842 e 213.790 (E-W). Fonte: CAESB (2000).

Variabilidade da precipitação na bacia do rio Pípiripau

A precipitação pluvial anual na bacia do rio Pípiripau, obtida em um pluviômetro em sua região central durante os últimos 32 anos (Estação Taquara, Cód. 01547013), é bastante variável (Figura 2). No período entre 1972 e 2004, a precipitação média anual foi de 1.306 mm, e o desvio-padrão, de 250 mm. Por meio da linha tendencial, observa-se que houve, no período, pequeno decréscimo na precipitação média anual, o qual não chega a ser estatisticamente significativo, podendo a série de precipitação pluvial anual ser considerada estacionária, de acordo com o teste de tendência (Salas, 1992).

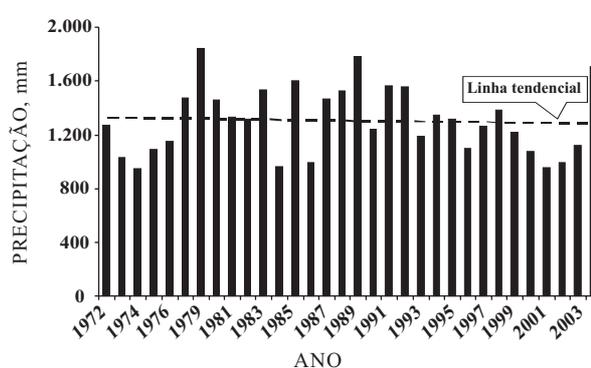


Figura 2. Variabilidade da precipitação pluvial na bacia do rio Pípiripau no período 1972-2005 e linha tendencial da série. Fonte: ANA (2005).

Seleção dos dados pluviométricos e dos cenários de uso e manejo do solo

Para avaliar detalhadamente o efeito da variabilidade climática sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento na bacia do rio Pípiripau, foram selecionados cinco anos representativos da série histórica de precipitação. Nesse sentido, selecionaram-se o ano mais seco (1974), o ano mais úmido (1979), aquele mais próximo da média da série (1982) e dois outros anos, representando a média menos o desvio-padrão (inferior) (2000) e a média mais o desvio-padrão (superior) (1992) da série, aqui denominados médio-seco e médio-úmido, respectivamente.

Para avaliar o efeito da mudança de uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e sobre o aporte de sedimento na bacia, foram selecionados os seguintes cenários: (a) o cenário atual da bacia (referência), onde predominam as pastagens plantadas e as áreas de agricultura, sob o manejo convencional (PC)⁽⁴⁾; (b) o cenário antes do início da colonização de Brasília, em 1960, onde predominavam os Cerrados e matas ciliares nativas (CER); e (c) o cenário de uso atual da terra, porém com as áreas de agricultura intensiva sob plantio direto (PD).

⁽⁴⁾ Neste manejo, é feito o cultivo anual com arado ou grade, com manutenção de pouca ou nenhuma cobertura do solo durante o período entre safras.

O plantio direto, considerada uma boa prática de manejo, proporciona menor compactação subsuperficial e maior cobertura do solo, resultando em maior infiltração e menor escoamento superficial. Além disso, a erosão do solo é reduzida em até 90 %, comparada à situação do preparo convencional (Derpsch, 1997).

Modelo de escoamento superficial e sua calibração

O cálculo do volume de escoamento superficial para cada um dos eventos dos anos selecionados foi o do Número-Curva do NRCS (NRCS, 1972; Chow et al., 1988). Esse modelo calcula o volume de escoamento superficial (Q , em mm) em função da precipitação (P_a , em mm) em cada evento, tendo como coeficiente de escoamento o Número-Curva, adimensional (CN, 0-100), e um fator de abstração (S , adimensional). O modelo é dado pelas equações 1 e 2:

$$Q = (P_a - 0,2 S)^2 / (P_a + 0,8 S) \quad (1)$$

em que

$$S = (25.400 / CN) - 254 \quad (2)$$

No cenário atual (PC), o cálculo do escoamento superficial gerado em cada um dos eventos chuvosos diários, nos cinco anos selecionados, requereu primeiramente a calibração do fator CN, usando hidrogramas observados bem definidos (sem superposição), depois de retirados os escoamentos de base, de acordo com o método de Linsley et al. (1982). Na figura 3 é mostrado um desses hidrogramas, usados na calibração de CN para a bacia.

Assim, os escoamentos diretos (Q) dos sete hidrogramas selecionados e suas correspondentes precipitações abatidas (P_a) foram usados para calibrar

o fator CN para a bacia na condição atual, por meio da solução iterativa das equações (1) e (2). A correção para a umidade antecedente (Chow et al., 1988) não foi realizada, pois estudos anteriores em uma pequena bacia monitorada no Distrito Federal indicaram que sua correção gerava ajustes piores do que sem correção (Chaves et al., 2003).

O valor calibrado de CN (média das calibrações individuais) para a condição atual (PC) foi de CN = 68,2. No caso do plantio direto, o CN estimado na literatura foi de 63,9, e CN = 57 foi o valor estimado para o cenário de Cerrado.

No caso do cenário CER (Cerrado), foram usados valores da literatura para uma combinação de solos e vegetação semelhante à do Cerrado (Rawls et al., 1992). Já no cenário de plantio direto (PD), o CN médio da bacia foi obtido através de uma média ponderada entre o valor calibrado para o cenário atual (acima) e aquele obtido na literatura para a condição de plantio direto (Pilgrim & Cordery, 1992).

Os valores de P_a (mm) usados na calibração e nas simulações foram os totais diários observados na estação Taquara (P_0 , em mm), os quais foram reduzidos, em função da área da bacia (A , em km²), por meio da equação 3, a seguir (Taborga Torrico, 1974):

$$P_a = P_0 (1 - 0,10 \log A/25) \quad (3)$$

Na calibração do CN para a condição atual (PC), o volume do escoamento superficial (Q) nos hidrogramas selecionados do posto fluviométrico Frinocap, situado no exutório da bacia do Pipiripau, foi obtido pela técnica de separação do escoamento de base (Linsley et al., 1982). Em cada um desses hidrogramas foram também identificadas as vazões de pico observadas ($q_{p \text{ obs}}$).

Modelo de aporte de sedimento

O modelo usado na estimativa do aporte de sedimento para a bacia foi a MUSLE (Williams, 1975). Sua simplicidade e seu pequeno número de variáveis tornam-na potencialmente útil para estimativa do aporte de sedimento em pequenas e médias bacias não monitoradas (Chaves, 1991). Na MUSLE, o aporte de sedimento (Y , em t) de cada evento é dado por:

$$Y = 89,6 (Q q_p)^{0,56} K L S C P \quad (4)$$

em que Q (m³) = volume de escoamento superficial do evento; q_p (m³ s⁻¹) = vazão de pico do evento; K (t h MJ⁻¹ mm⁻¹) = erodibilidade média dos solos da bacia; L (adim.) = fator de comprimento de rampa médio da bacia; S (adim.) = fator de declividade de vertentes médio da bacia; C (adim.) = fator de uso e manejo do solo médio da bacia; e P (adim.) = fator de práticas conservacionistas médio da bacia.

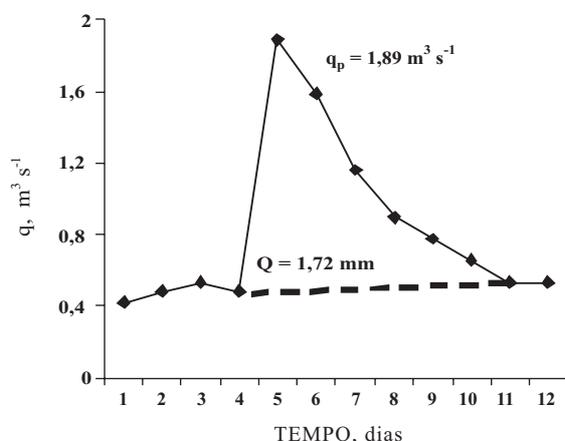


Figura 3. Exemplo de hidrograma da série de vazões observadas da bacia do Pipiripau, usado para calibração de CN (a linha tracejada é o escoamento de base).

Vazão de pico

A vazão de pico calculada (q_p) para cada um dos eventos chuvosos dos cinco anos selecionados foi calculada por meio de uma relação empírica, obtida entre os volumes de escoamento superficial (Q_0) e as vazões de pico observadas ($q_{p\text{ obs}}$) nos eventos usados para calibração do fator CN. Essa simplificação é possível, pois na equação da vazão de pico do método do hidrograma triangular sintético do NRCS (1972) todas as variáveis são constantes, exceto o volume de escoamento superficial, Q , ou seja (Schwab et al., 1981):

$$q_p = 0,0021Q A / t_p \quad (5)$$

em que q_p ($m^3 s^{-1}$) = vazão de pico do evento; Q (mm) = volume de escoamento superficial; A (ha) = área da bacia; e t_p (h) = tempo de pico do hidrograma.

A relação empírica obtida entre os volumes de escoamento superficial observados (depois da separação do escoamento de base) e as vazões de pico observadas foi a seguinte:

$$q_p = 2,17 Q \quad (R^2 = 0,79) \quad (6)$$

A figura 4 apresenta o ajuste obtido entre $q_{p\text{ obs}}$ e Q_0 . A vantagem dessa equação é que ela não requer a estimativa do tempo de pico (t_p) da bacia, o qual envolve incertezas significativas (Pilgrim & Cordery, 1992).

Erodibilidade dos solos

A erodibilidade dos solos da bacia (K) foi calculada pela média ponderada das erodibilidades de cada um dos seus solos, obtida a partir do mapa pedológico (CAESB, 2000), e de uma equação empírica, relacionando o valor de K de solos dos Cerrados e suas propriedades físicas e químicas (Chaves, 1996). A equação usada na estimativa de K foi (Chaves, 1996):

$$K = -0,00043 (AF + SIL)/CO + 0,000437 AR + 0,000862 SIL \quad (R^2 = 0,94) \quad (7)$$

em que K ($t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}$) = erodibilidade do solo; AF (%) = percentagem de areia fina do solo; SIL

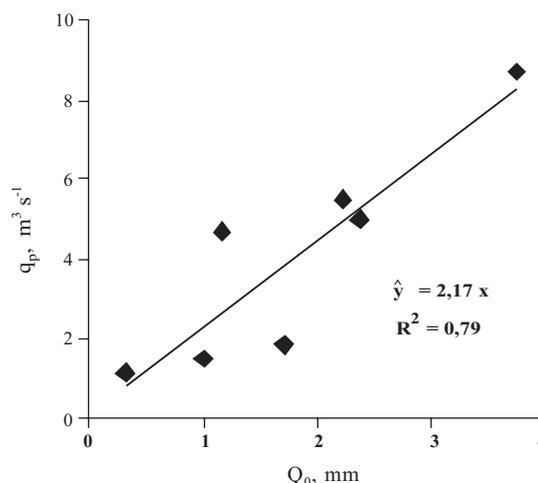


Figura 4. Relação entre os volumes de escoamento superficial (Q_0) e vazões de pico ($q_{p\text{ obs}}$) observados.

(%) = percentagem de silte do solo; AR (%) = percentagem de areia do solo; e CO ($dag kg^{-1}$) = percentagem de C orgânico do solo.

No quadro 1 são apresentadas as principais classes de solos da bacia do rio Pípiripau, suas texturas (horizonte A) e o valor de K calculado de acordo com a equação 7.

Fator de comprimento de rampa

O fator de comprimento de rampa médio da bacia foi calculado por meio da seguinte equação (Wischmeier & Smith, 1978):

$$L = (l / 22,1)^M \quad (8)$$

em que l (m) = comprimento de rampa médio da bacia; e M (0,1 – 0,5) = variável dependente da declividade média da bacia.

O comprimento médio de rampa da bacia (l) foi, por sua vez, calculado em função da sua densidade de drenagem, pela seguinte relação (Chow et al., 1988):

Quadro 1. Principais solos da bacia do rio Pípiripau, com valores de textura, carbono orgânico e erodibilidades, calculados de acordo com a equação (6)

Solo	Areia fina	Silte	Areia	CO	K
Latossolo Vermelho	5,0	9,0	13,0	3,4	0,012
Latos. Vermelho-Amarelo	10,0	13,0	17,0	2,2	0,014
Cambissolo	3,0	34,0	42,0	2,6	0,028
Neossolo Quartzarênico	32,0	5,0	87,0	1,2	0,029
Nitossolo Vermelho	4,0	34,0	8,0	2,7	0,027
Gleissolo Háptico	2,0	56,0	3,0	3,0	0,041

$$l = 1/(2 D_d) \quad (9)$$

em que D_d (km^{-1}) = densidade de drenagem da bacia, obtida por meio de análise espacial (*raster*) no SIG⁽⁵⁾.

Fator de declividade de vertentes

O fator de declividade de vertentes da bacia (S) foi calculado pela equação de Wischmeier & Smith (1978):

$$S = 0,065 + 0,0456 s + 0,00654 s^2 \quad (10)$$

em que s (cm m^{-1}) = declividade média da bacia, obtida por análise espacial no SIG.

Fator de uso e manejo do solo

O fator de uso e manejo do solo médio da bacia (C) foi calculado para os três cenários de uso e manejo utilizados, por meio da média ponderada, tendo a área parcial como fator de ponderação. No caso do cenário de Cerrado (CER), foram usados os valores obtidos por Wischmeier (1975) para formações florestais e arbustivas nativas do sudoeste dos EUA.

No caso dos demais cenários (PC e PD), o fator C foi calculado para a região do Distrito Federal, usando-se as relações de perda de solos para a cultura da soja, obtidas no IAC em Campinas (Bertoni & Lombardi Neto, 1991), e as erosividades mensais médias das chuvas da bacia do rio Pípiripau, estimadas para a série de 32 anos da bacia. Em ambos os cenários (PC e PD), o fator C foi obtido pela seguinte equação (Foster & Lane, 1987):

$$C = \sum (R_i \text{SLR}_i) \quad (11)$$

em que R_i (%) = % da erosividade média do mês i para a bacia do rio Pípiripau; e SLR_i (adim.) = razão de perda de solo do mês i , nas parcelas do IAC.

A utilização da equação (11) e dos dados de Campinas (SP) na estimativa dos fatores C para áreas de lavouras do DF é possível, pois a distribuição da erosividade das chuvas das duas regiões é semelhante (Chaves et al., 2004).

No caso do cenário do preparo convencional (PC), considerou-se que apenas uma cultura (soja) era plantada anualmente, enquanto no plantio direto (PD), além da cultura de soja no verão, havia uma safrinha (milho, milheto etc.) no outono, com subsequente cobertura do solo durante o inverno.

Fator de práticas conservacionistas

No caso do cenário de Cerrado (CER), o fator P, por definição, é igual a 1,0 (Wischmeier & Smith, 1978). No caso dos cenários de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), considerou-se que plantio em nível era utilizado em todas as áreas agrícolas (43 % da área total da bacia), e, neste caso, $P = 0,5$ (Wischmeier & Smith, 1978). Assim, o valor de P médio para a bacia, nesses dois últimos cenários, foi calculado por meio de média ponderada, tendo a área dos diferentes tipos de uso como fator ponderador.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da variabilidade climática da bacia do Pípiripau

Os anos selecionados para representar a variabilidade da precipitação, no período compreendido pela série histórica do pluviômetro da bacia do rio Pípiripau, são apresentados no quadro 2.

O coeficiente de variação da precipitação pluvial anual foi de 26,8 % (Quadro 2), sendo a diferença entre o ano mais seco e o mais úmido da série histórica de

Quadro 2. Anos selecionados para caracterização da variabilidade de precipitação da bacia do rio Pípiripau, no período 1972-2004, com valores de precipitação pluvial anual observada (P_{anual}), precipitação pluvial anual abatida ($P_{\text{anual ab}}$), precipitação média em 24 h ($P_{24 \text{ h med}}$) e precipitação máxima em 24 h ($P_{24 \text{ h max}}$)

Ano	Condição	Dias de Chuva	P_{anual}	$P_{\text{anual ab}}$	$P_{24 \text{ h (med)}}$	$P_{24 \text{ h (max)}}$
mm						
1974	Seco	115	951	858	7,5	55,4
2000	Médio-Seco	125	1.077	972	7,8	63,2
1982	Médio	133	1.313	1.185	8,9	62,7
1992	Médio-Úmido	151	1.555	1.414	9,1	95,7
1979	Úmido	147	1.843	1.664	11,3	90,9
	Média	134	1.348	1.219	8,9	73,6
	DP	15	361	327	1,5	18,3
	CV (%)	11,2	26,8	26,8	16,9	24,9

⁽⁵⁾ Arc-View® V. 3.2a, Módulo *Spatial Analyst*.

400 mm ano⁻¹. Apesar dessas diferenças interanuais significativas, a série histórica de 32 anos pode ser considerada estacionária, conforme indica a linha tendencial quase horizontal da série (Figura 1).

A diferença entre totais anuais pontuais P_0 (medidos no pluviômetro) e P_a (especializados na bacia), calculados pela equação de abatimento de chuva (3), foi de 9,6 %. No caso dos valores diários de precipitação (P_{24h}), o coeficiente de variação dos valores médios nos cinco anos analisados foi de 16,9 %, e o das máximas, de 24,9 %.

Escoamento superficial e vazão de pico nos anos selecionados

Na figura 5 é mostrado o ajuste obtido entre volumes de escoamento superficial (Q) de eventos calculados pelas equações (1 e 2) e os observados da série, com R^2 de 0,83.

Para cada um dos eventos chuvosos dos cinco anos selecionados, Q e q_p foram calculados nos três cenários de uso e manejo do solo, por meio das equações (1 e 2)

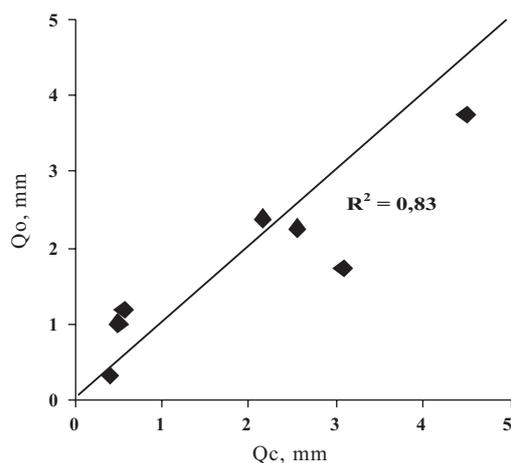


Figura 5. Ajuste obtido entre volumes de escoamento superficial calculados e observados (cenário atual).

e (6), respectivamente. No quadro 3 encontra-se o resumo dos valores de P anual, Q total anual, bem como a vazão média anual observada da série (q_{obs}), para os anos e cenários usados.

Como observado no quadro 3, o volume de escoamento médio anual (Q) na condição atual (PC) foi 1,5 vez maior que na condição de PD e 3,4 vezes maior que na condição de Cerrado nativo. Já o coeficiente de variação (CV) de Q para os três cenários estudados foi quatro vezes maior que o CV (P_a), indicando amplificação significativa no escoamento direto em relação à chuva. Esses resultados confirmam a alta sensibilidade do escoamento em relação a aumentos de precipitação, reconhecida anteriormente por Tucci (2002) e Quermer et al. (2005).

Aporte de sedimento nos períodos e cenários estudados

Antes da aplicação da MUSLE aos eventos dos anos e cenários selecionados, foi necessária a estimativa dos fatores K , L , S , C e P para a bacia do Pipiripau.

Erodibilidade dos solos da bacia

No caso da erodibilidade da bacia (K), o valor médio ponderado foi de $K = 0,0177 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Na figura 6 é apresentada a distribuição de K para os solos da bacia, calculada por meio da equação (7). Pode-se observar que a erodibilidade dos solos variou de 0,012 (Latossolos) a 0,041 $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Gleissolos).

Comprimento médio das vertentes da bacia

O comprimento médio das vertentes da bacia, calculado pela equação (9), foi de $l = 740 \text{ m}$. A declividade média da bacia, calculada por análise espacial no SIG, foi de $s = 5,5 \text{ cm m}^{-1}$ (Figura 7), a qual, aplicada à equação (8), resultou em um valor de $L = 4,2$ para a bacia. Pela figura 7, observa-se que as áreas próximas aos canais são as que apresentam as maiores declividades, com as menores situando-se nos interflúvios.

Quadro 3. Valores anuais, médias e coeficientes de variação (CV) da precipitação pluvial anual (P_{anual}) e escoamento superficial (Q) na condição atual (PC), plantio direto (PD) e Cerrado nativo (CER) e vazão média observada

Ano	Condição	P_{anual} , Q_{PC} , Q_{PD} , Q_{CER}				q_{obs}
		mm ano ⁻¹				
1974	Seco	858	15,2	8,6	2,8	3,0
2000	Médio-Seco	972	10,8	6,7	2,9	1,9
1982	Médio	1.185	21,2	11,9	4,2	4,2
1992	Médio-Úmido	1.414	49,3	33,6	17,2	4,6
1979	Úmido	1.664	109,1	71,8	32,9	6,2
	Média	1.219	41,1	26,5	12,0	4,0
	CV (%)	26,8	99,3	106,6	109,6	40,6

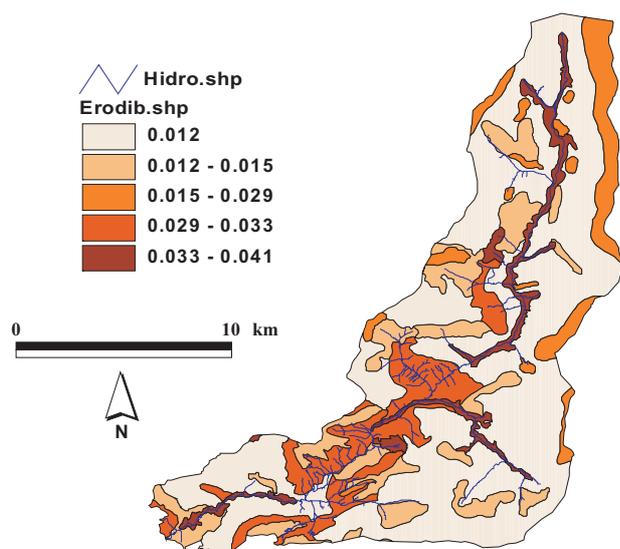


Figura 6. Mapa da erodibilidade dos solos da bacia do rio Pípiripau. As coordenadas UTM nas extremidades da bacia são de 8.289.876 e 8.264.635 (N-S) e 235.842 e 213.790 (E-W).

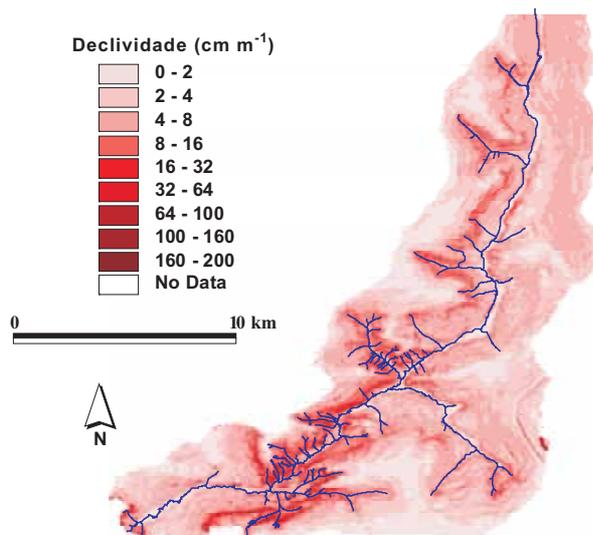


Figura 7. Declividade das vertentes (cm m^{-1}) da bacia do rio Pípiripau. As coordenadas UTM nas extremidades da bacia são de 8.289.876 e 8.264.635 (N-S) e 235.842 e 213.790 (E-W).

Fator de declividade de vertentes da bacia

Para o fator de declividade de vertentes, aplicando-se a equação (10) à declividade média, obteve-se um valor de $S = 0,51$ para a bacia do Pípiripau.

Fator de uso e manejo do solo da bacia

No caso do fator C, obtido pela média ponderada dos usos e manejos do solo em cada um dos cenários, os valores médios para a bacia são apresentados no quadro 4. Nas áreas de agricultura (43 % da área da bacia), o fator C foi calculado de acordo com a equação (11) para as condições de erosividade da chuva da bacia, bem como para os dados de perdas de solo de Campinas (SP), para a cultura da soja, nos preparos convencional (PC) e direto (PD).

Apesar de se reconhecer o fato de que o fator C para os cenários de agricultura é variável ao longo do ano (Lafren et al., 1985), mas tendo em vista que o objetivo deste trabalho foi o de comparar diferentes cenários, usou-se o valor médio anual e não mensal de C na MUSLE (equação 4), para o caso do aporte de sedimento para os cenários PC e PD.

Fator de práticas conservacionistas da bacia

Quanto ao fator de práticas conservacionistas (P), o valor de $P = 1,0$ foi usado para as áreas de Cerrado e pastagem, e o valor de $P = 0,5$ (plantio em nível), para as áreas de agricultura (PC e PD) (Wischmeier & Smith, 1978; Bertoni & Lombardi Neto, 1991). No caso dos cenários de PC e PD, o valor médio ponderado de P para a bacia foi de 0,76.

Aporte de sedimento

No quadro 5 são apresentados as médias, os desvios-padrão e o coeficiente de variação do aporte de sedimento em relação à precipitação pluvial anual em cada um dos cenários estudados, nos cinco anos selecionados.

Pelo quadro 5, conclui-se que, comparado ao cenário de Cerrado (CER), o aporte de sedimento no cenário atual (PC) foi, em média, 11 vezes maior, e três vezes maior no cenário de plantio direto (PD).

Os valores de aporte de sedimento nos anos selecionados e cenários usados são apresentados na figura 8, onde se observa que, como no caso do

Quadro 4. Valores médios do fator C da MUSLE para pastagem degradada, agricultura convencional e agricultura sob plantio direto, nos cenários PC e PD. Nas três colunas da direita são apresentados os valores médios do fator C para a bacia, nos três cenários

Cenário	PC e PD	PC	PD	CER	PC	PD
Uso/Área	Pastagem degradada	Agricultura (soja)	Agricultura (soja + safrinha)	Média da Bacia	Média da Bacia	Média da Bacia
Fator C	0,10	0,19	0,05	0,030	0,114	0,054

Quadro 5. Médias, desvios-padrão, coeficientes de variação da precipitação pluvial anual (P_{anual}) e aporte de sedimento (Y) nos cenários atual (PC), plantio direto (PD) e Cerrado nativo (CER)

Ano	Condição	P	Y_{PC}	Y_{PD}	Y_{CER}
		mm ano ⁻¹	t ano ⁻¹		
1974	Seco	858	8.570	2.212	459
2000	Médio-Seco	972	6.375	1.847	518
1982	Médio	1.185	11.980	3.136	730
1992	Médio-Úmido	1.414	31.157	9.940	3.582
1979	Úmido	1.664	66.975	20.420	6.570
	Média	1.219	25.012	7.511	2.372
	CV (%)	26,8	101,7	105,6	113,3

escoamento superficial, o aporte de sedimento aumenta exponencialmente com o aumento da precipitação pluvial anual, nos três cenários estudados. Nesta figura, nota-se também que o aumento no aporte de sedimento é mais acentuado no caso do cenário atual (PC), seguido do plantio direto (PD) e do Cerrado (CER); os valores de R^2 obtidos para as funções exponenciais são todos acima de 0,92.

Aumentos mais pronunciados nas taxas de erosão do solo sob preparo convencional (PC), comparativamente àqueles sob plantio direto (PD), já haviam sido reportados por Williams et al. (2001) no Meio-Oeste dos EUA, em razão de aumento de chuvas intensas e da temperatura.

Na figura 9 é apresentada a variação da média dos aportes de sedimento anuais (média dos eventos individuais) em função da média das precipitações em 24 h. O comportamento foi semelhante ao da figura 8, ou seja, os aumentos de Y_m foram exponenciais com o aumento de P_{24h} na mesma ordem, ou seja, $Y_{PC} > Y_{PD} > Y_{CER}$. Uma possível explicação para isso é que as médias das precipitações em 24 h apresentam relação linear com os volumes de precipitação pluvial anual.

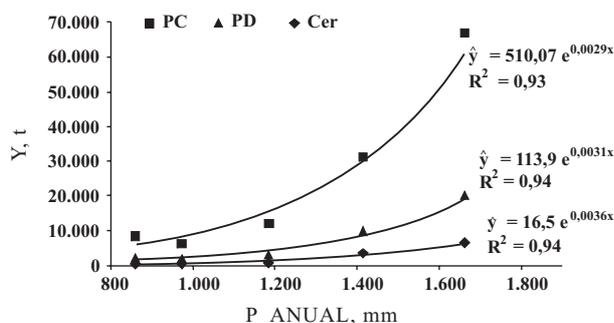


Figura 8. Relação entre o aporte de sedimento total anual (Y) e a precipitação pluvial anual (P_{anual}).

A razão pela qual tanto o aporte de sedimento (Y) como o volume de escoamento superficial (Q) apresentaram aumento exponencial com o volume de precipitação pluvial anual reside na estrutura da equação 4. Entre si, Y e Q apresentam relação linear, conforme indica a figura 10.

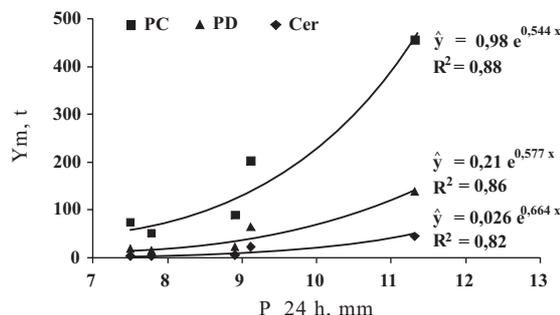


Figura 9. Variação da média do aporte de sedimento anual em função da variação das médias da precipitação em 24 h.

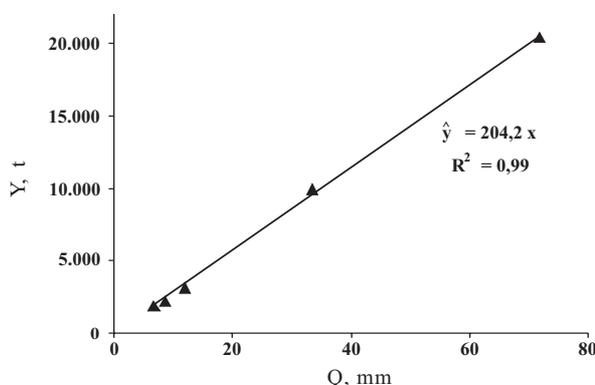


Figura 10. Relação entre o aporte de sedimento anual (Y) e o volume de escoamento superficial anual (Q) na bacia do rio Pípiripau (cenário PD), para os anos selecionados.

CONCLUSÕES

1. Tanto o volume de escoamento superficial como o aporte de sedimento anual aumentaram exponencialmente com o aumento da precipitação pluvial anual, sendo o aumento mais acentuado no cenário atual (PC), seguido dos cenários de plantio direto (PD) e Cerrado nativo (CER).

2. Nos cinco anos estudados, o volume de escoamento superficial médio foi de 41,1, 26,5 e 12,0 mm para os cenários PC, PD e CER, respectivamente. Já aporte de sedimento médio foi de 25.012, 7.511 e 2.372 t ano⁻¹ para os cenários PC, PD e CER, respectivamente, indicando que, além da variabilidade de precipitação, o tipo de uso e manejo afetou de forma significativa o escoamento superficial e o aporte de sedimento no período estudado.

3. Enquanto o coeficiente de variação da precipitação pluvial anual foi de 26,8 % no período estudado, os coeficientes de variação do escoamento direto (Q) e do aporte de sedimento (Y) anual variaram entre 100 e 113 %, indicando uma importante amplificação hidrossedimentológica, com conseqüências ambientais importantes em termos de aumento de escoamento e de sedimentação.

LITERATURA CITADA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA Site *Hidroweb*/ANA www.ana.gov.br. 2005.
- BARROS, V.; DOYLE, M. & CALILLONI, I. Potential impacts of climate change in the Plata basin. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. Regional hydrological impacts of climate change impact assessment and decision-making. Wallingford, IAHS, 2005. p.11-18.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo, Ícone, 1991. 355p.
- CAESB. Plano de proteção ambiental da bacia hidrográfica do rio Pípiripau diagnóstico ambiental. Brasília, 2000. 89p.
- CHAVES, H.M.L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE). R. Bras. Ci. Solo, 15:345-350, 1991.
- CHAVES, H.M.L. Modelagem matemática da erosão hídrica: Passado, presente e futuro. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.731-750.
- CHAVES, H.M.L.; BRAGA, B.; DOMINGUES, A.F. & SANTOS, D.G. Quantificação dos benefícios ambientais e compensações financeiras do "Programa do Produtor de Água (ANA)". I. Teoria. R. Bras. Rec. Hídricos, 9:5-14, 2004.
- CHAVES, H.M.L.; SOUZA, E.; SILVA, C. & OLIVEIRA, C. Reliability of the NRCS (SCS) equation in the estimation of runoff in small ungaged basins in Brazil. In: IAHS SCIENTIFIC ASSEMBLY, 7., Symposium S1- Sediment Budgets Abstracts. Foz do Iguaçu, 2005. (meio magnético)
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. Applied hydrology. New York, McGraw-Hill, 1988. 572p.
- D'ODORICO, P.; RIDOLFI, L.; PORPORATO, A. & RODRIGUEZ ITURBE, I. Preferential states of seasonal soil moisture: The impact of climate fluctuations. Water Res. Res., 36:2209-2219, 2000.
- DERPSCH, R. Agricultura sustentável. In: SATURNINO, H. & LANDERS, J., eds. Meio ambiente e plantio direto. Brasília, APDC, 1997. p.29-48.
- DIAZ, R.A. & QUERNER, E.P. Estimating the climate change effect upon flood risk reduction by afforestation. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making. Wallingford, IAHS, 2005. p.248-253.
- FOSTER, G.R. & LANE, L. Beyond the USLE: Advancements in soil erosion prediction. In: BOERMA, J., ed. Future developments in soil science research. Madison, Soil Science America Society 1987. p.315-326.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. Suíça, 2001. 18p.
- LAFLEN, J.M.; FOSTER, G.R. & ONSTAD, C.A. Simulation of individual-storm soil loss for modeling the impact of soil erosion on crop productivity. In: EL-SWAIFY, S.A.; MOLDENHAVER, W.C. & LO, A., eds. Soil erosion and conservation, Ankeny, SCSA, 1985. p.285-295.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A. & PAULHUS, J.L.H. Hydrology for engineers. New York, McGraw-Hill, 1982. 508p.
- NATURAL RESOURCE CONSERVATION SERVICE - NRCS. National engineering handbook: Hydrology. Washington, 1972. 550p.
- PILGRIM, D.H. & CORDERY, I. Flood runoff. In: MAIDMENT, D., ed. Handbook of hydrology. New York, Mc Graw-Hill, 1992. p.9.1-9.42.
- QUERMER, E.; JONKER, R.; PADOVANI, C.; SORIANO, B. & GALDINO, S. Impact of climate changed and agricultural developments in the Taquari river basin, Brazil. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making. Wallingford, IAHS, 2005. p.11-18.

- RAWLS, W.J.; AHUJA, L.R.; BRAKENSIEK, D.L. & SHIMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D., ed. Handbook of hydrology. New York, McGraw-Hill, 1992. p.5.1-5.51.
- SALAS, J.D. Analysis and modeling of hydrologic time series. In: MAIDMENT, D., ed. Handbook of hydrology. New York, McGraw-Hill, 1992. p.19.1-19.72.
- SCHWAB, G.O.; FREVERT, R.K.; EDMINSTER, T.W. & BARNES, K.K. Soil and water conservation engineering. 3.ed. New York, John & Wiley, 1981. 525p.
- TABORGA-TORRICO, J. Práticas hidrológicas. Rio de Janeiro, Trascos, 1974. 120p.
- TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos do Brasil. Brasília, ANA, 2002. 70p. (Relatório de Consultoria)
- WAGENER, T. & FRANKS, S. Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making. In: WAGENER, T.; FRANKS, S.; GUPTA, H.V.; BGH, E.; BASTIDAS, L.; NOBRE, C. & GALVÃO, C.O., eds. Regional hydrological impacts of climate change - impact assessment and decision-making. Wallingford, IAHS, 2005. p.1-8.
- WALLING, D.E. Linking land use, erosion, and sediment yields in river basins. Hydrobiologia, 410:223-240, 1999.
- WILLIAMS, A.; NEARING, M.; HABECK, M.; SOUTHWORTH, J.; PFEIFER, R.; DOERING, O.; DEBOER, J.; RANDOLPH, J. & MAZZOCC, M. Global climate change: Implications of extreme events for soil conservation strategies and crop production in the Midwestern United States. In: SOTT, D. & NEARING, M., eds. SUSTAINING THE GLOBAL FARM, ISCO MEETING, 2001. Proceedings. West Lafayette, Purdue University, 2001. p.509-515.
- WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. USDA-ARS S-40: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Washington, 1975. p.244-252.
- WISCHMEIER, W.H. Estimation the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas. In: USDA-ARS S-40: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Washington, USDA, 1975. p.118-124.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses- A guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (Handbook, 537)
- ZHANG, C.; NEARING, M.A.; GARBRECHT, J.D. & STEINER, J.L. Downscaling monthly forecasts to simulate impacts of climate change on soil erosion and wheat production. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1376-1385, 2004.