

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

Dulce Buchala Bicca Rodrigues

**AVALIAÇÃO HIDROLÓGICA E RISCO DE EROSÃO EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS**

CAMPO GRANDE
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

Dulce Buchala Bicca Rodrigues

**AVALIAÇÃO HIDROLÓGICA E RISCO DE EROSÃO EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Elói Panachuki

Aprovada em: 07/07/2010

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho
Orientador – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Daniel Fonseca de Carvalho
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Campo Grande, MS
2010

Ficha catalográfica preparada pela
COORDENADORIA DA BIBLIOTECA CENTRAL/UFMS

Rodrigues, Dulce Buchala Bicca Rodrigues

Avaliação hidrológica e risco de erosão em bacias hidrográficas /
Dulce Buchala Bicca Rodrigues. Campo Grande, 2010.
53p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho

1. Modelo USLE. 2. Método CN. 3. Simulador de chuvas

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, autor da bíblia e da vida. Ao Paulo Tarso e minha família, essenciais e preciosos companheiros de cada etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Teodorico Alves Sobrinho, pela valiosa orientação, disposição e companheirismo desfrutados durante todo o ciclo de aprendizado do curso de mestrado sob sua orientação.

Ao Professor Dr. Elói Panachuki, pela orientação, cooperação e todas as inestimáveis gentilezas prestadas por ele e sua família.

Aos orientados do Professor Dr. Elói Panachuki, estudantes da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, pelo precioso auxílio nos trabalhos de campo e de laboratório.

As estagiárias Caroline Alvarenga Pertussati e Laís Cristina Rebucci pela excelente dedicação e esforço prestados ao grupo de pesquisa, em suas diversas e árduas etapas de trabalho.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Hidráulica e Transportes da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, pelo apoio e colaboração nos trabalhos de campo e laboratoriais.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) pela bolsa de estudo concedida.

À Igreja Presbiteriana Independente - Central, minha família em Cristo, por compartilharem parte suas vidas comigo.

SUMÁRIO

Sumário	5
Introdução Geral	7
Capítulo 1 - Nova Abordagem sobre o Modelo Brasileiro de Serviços Ambientais I: Avaliação do Risco Natural de Erosão e da Aptidão Agrícola.....	8
1. Introdução	9
2. Material e Métodos	10
2.1 Área de Estudo	10
2.2 Delineamento do Estudo	11
2.3 Modelo USLE	12
2.3.1 Fator Erosividade Média Anual - R.....	12
2.3.2 Fator Erodibilidade - K.....	13
2.3.3 Fator Topográfico - LS	13
2.3.4 Tolerância a Perda de Solo (T).....	14
2.4 Modelos de Aplicação de Serviços Ambientais.....	14
2.4.1 Programa CRP	14
2.4.2 Programa Produtor de Água	15
2.5 Propostas de Conservação	15
3. Resultados e Discussão	16
4. Conclusões	20
5. Referências Bibliográficas.....	20
Capítulo 2 - Nova abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais II: avaliação hidrológica de propostas de conservação ambiental	24
1 Introdução	25
2 Material e Métodos	26
2.1 Área de Estudo	26
2.2 Determinação de Cenários de Mudanças de Uso e Cobertura do Solo.....	27
2.3 Redução da Erosão	28
2.4 Redução do Escoamento	29
3 Resultados e Discussão	32
3.1 Cenários de Mudança de Uso e Cobertura do Solo.....	32
3.2 Modelos de Avaliação de Cenários de Mudança de Uso e Cobertura do solo.....	33
3.3 Valoração de PSA	35
4 Conclusões	35
5 Referências Bibliográficas.....	36
Capítulo 3 - Simulador de chuvas portátil aplicado a estimativa do parâmetro CN do método runoff Curve Number (CN)	39
1 Introdução	40
2 Material e Métodos	41

2.1	Área de Estudo	41
2.2	Aplicação do Simulador de Chuvas	41
2.3	Modelo Horton	43
2.4	Método Runoff Curve Number (CN)	44
2.5	Estimativas do Parâmetro CN	45
2.5.1	Metodologias $CN_{0,2}$ e $CN_{0,05}$	45
2.5.2	Metodologia CN_{fc}	45
2.5.3	Metodologia $CN_{Ia/S}$	46
2.5.4	Conversão dos Valores de CN	46
2.5.5	Análise de Dados	46
3	Resultados e Discussão	47
4	Conclusões	49
5	Referências Bibliográficas.....	50
	Conclusões Gerais.....	53

INTRODUÇÃO GERAL

A erosão do solo é mundialmente reconhecida como uma ameaça a viabilidade de produção agrícola e a disponibilidade hídrica. Promove prejuízos de ordem econômica, social e ambiental advindos da degradação do solo e da água, incluindo efeitos adversos ao ecossistema terrestre e aquático. Assim, o incentivo econômico para o controle efetivo de processos erosivos, torna-se vantajoso, pelo incremento da produtividade, e benéfico, pela contribuição a conservação ambiental.

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é um mecanismo baseado na compensação de ações de conservação, que torna a gestão de bacias hidrográficas mais eficiente em relação ao princípio poluidor-pagador, estabelecido na Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal 6938/81). Os benefícios dos serviços ambientais não são favoráveis somente aos usuários da bacia que executam práticas de conservação, mas a sociedade como um todo desfruta-os, seja a curto ou longo prazo. A Constituição Federal de 1988 impõe ao Poder Público e à coletividade o dever de defender e preservar o meio ambiente ecologicamente equilibrado para as presentes e futuras gerações.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas desenvolve o Programa “Produtor de Água”, no qual são propostos incentivos financeiros proporcionais aos benefícios relativos à redução da erosão advinda da implantação de projetos de conservação. Os recursos do programa governamental se destinam ao financiamento parcial ou total dos custos adicionais da realização de alterações positivas no uso e manejo do solo. A Política Nacional dos Serviços Ambientais encontra-se em elaboração através do Projeto de Lei 5.487/09.

Buscando-se definir um planejamento estratégico de conservação do solo, para otimização do modelo brasileiro de serviços ambientais, este trabalho apresenta capítulos que abrangem propostas para diferentes etapas do processo de PSA (Figura 1).



Figura 1. Etapas do processo de PSA abordadas nos capítulos que integram o trabalho de dissertação

Os estudos estabelecidos incluem diversas metodologias que tomaram por base uma bacia hidrográfica próxima ao pantanal brasileiro ocupada predominantemente pela atividade pecuária.

CAPÍTULO 1

Nova abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais I: avaliação do risco natural de erosão e da aptidão agrícola

Resumo: O programa brasileiro de serviços ambientais, denominado Produtor de Água, e o programa Conservation Reserve Program (CRP) dos Estados Unidos baseiam-se em diferentes fatores da Universal Soil Loss Equation (USLE) para aplicação de incentivos econômicos visando à conservação do solo e água. O programa Produtor de Água é baseado em alterações do uso e manejo do solo enquanto que o CRP prioriza áreas de maior risco natural de erosão. Tendo em vista as diferentes metodologias de implantação de ambos os programas, analisaram-se os critérios de elegibilidade das áreas a serem contempladas e propostas indicadas de uso e manejo do solo de acordo com a aptidão agrícola local. Para tanto, tomou-se por base uma bacia hidrográfica próxima ao pantanal brasileiro ocupada predominantemente por atividade pecuária. Identificou-se que o programa CRP abrange apenas 38% da área agrícola passível de ser contemplada pelo programa Produtor de Água. A união de áreas naturalmente propensas a erosão juntamente às restrições advindas da classificação de aptidão agrícola, reduz drasticamente as alternativas de uso do solo, direcionando-as, em grande parte, para a atividade pecuária. Deste modo, propõe-se uma adaptação na base de aplicação do programa brasileiro de serviços ambientais, definindo-se um planejamento estratégico de conservação do solo. Assim, os recursos financeiros destinados ao pagamento de serviços ambientais poderão ser direcionados de forma mais eficiente visando o beneficiamento de regiões mais propensas a erosão e adequação do uso e manejo do solo.

Palavras-chave: Uso sustentável do solo, planejamento estratégico de conservação do solo, políticas agro-ambientais

Abstract: The Brazilian program of environmental services and the Conservation Reserve Program (CRP) of United States are based on different factors of the Universal Soil Loss Equation (USLE) for application of economic incentives for soil and water conservation. The Brazilian program is based on changes in soil use and management, while CRP prioritizes areas at greatest natural risk of erosion. We analyzed the eligibility criteria of areas and the conservation proposals in according to land capability of a rural watershed near the Brazilian Pantanal. The results showed the CRP program covers only 38% of agricultural area that could be addressed by the Brazilian Program. The union of areas naturally prone to erosion with the use constraints reduced the alternatives for land use, which directs to the cattle activity. Thus, we propose an adaptation on the basis of application of the Brazilian program of environmental services, which defines a strategic planning of soil conservation and directs more efficiently the financial resources for payment of environmental services in Brazil.

Keywords: Sustainable land use, strategic planning for soil conservation, agri-environmental policies

1. INTRODUÇÃO

A mitigação de externalidades negativas das atividades agrícolas em bacias hidrográficas pode ser incentivada pelo Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) realizado por usuários de água a jusante, ou instituições governamentais, que contribuem voluntariamente para o custeio de práticas de conservação promovidas à montante (Engel *et al.*, 2008). Os serviços ambientais representam os benefícios que a população desfruta a partir de funções do ecossistema (Costanza *et al.*, 1997, 1998). O PSA apóia-se no princípio do provedor-recebedor, em substituição ao tradicional poluidor-pagador (Kosoy *et al.*, 2007; Engel *et al.*, 2008).

O uso do solo é capaz de prover uma variedade de serviços ambientais a partir da regulação de fluxos hidrológicos, de carbono e da biodiversidade (Pagiola *et al.*, 2005; Wunder, 2007). Em diversos países, programas de PSA foram aplicados a conservação dos recursos hídricos por meio da preservação de florestas e atividades de reflorestamento, tais como: Equador (Wunder & Alban, 2008), Costa Rica (Pagiola, 2008), México (Muñoz-Piña *et al.*, 2008) e Bolívia (Asquith *et al.*, 2008). Por outro lado, no Reino Unido (Dobbs & Pretty, 2008) e China (Bennett, 2008) há incentivos econômicos para práticas agrícolas de conservação.

Os Estados Unidos implementam, desde 1985, um programa de PSA, denominado Conservation Reserve Program (CRP), que promove incentivo econômico para práticas de conservação do solo em propriedades rurais (FSA, 1985). O programa CRP encontra-se aplicado em 13,7 milhões de hectares (USDA, 2008) e estima-se que já foram investidos \$2,91 para retenção de cada tonelada de solo (Pimentel *et al.*, 1995). Uri & Lewis (1998) apontam que, após a implantação do programa, houve redução na perda de solo de, aproximadamente, 3,4 bilhões de toneladas em 1982 para cerca de 2 bilhões em 1997. Além disso, foram diagnosticadas reduções significativas em despesas no processo de tratamento da água proveniente dos mananciais inseridos em parte das áreas contempladas pelo programa CRP, devido ao controle da poluição difusa (Postel & Thompson, 2005).

O programa CRP utiliza a Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) para estimativa da perda de solo e prioriza sua aplicação nas áreas classificadas como altamente erodíveis (Highly Erodible Lands – HEL), definidas por meio da razão entre o potencial natural de erosão e os valores de tolerância a perda de solo (FSA, 1985; USDA-NRCS, 2006; Renschler & Harbor, 2002; Lant *et al.*, 2005). Essa relação também pode ser

denominada por risco natural de erosão (Basic *et al.*, 2004; Boellstorff & Benito, 2005; Schiettecatte *et al.*, 2008).

No Brasil, o programa de serviços ambientais, denominado Produtor de Água, é baseado em alterações do uso e cobertura do solo, propondo-se incentivos financeiros proporcionais aos benefícios relativos à redução da erosão advinda da implantação de projetos de conservação. A USLE é utilizada, de modo simplificado, apoiando-se apenas nos fatores antrópicos, para determinação dos valores de PSA (Chaves *et al.*, 2004; ANA, 2008).

Tendo em vista, as diferentes metodologias de implantação dos programas de serviços ambientais no Brasil e nos Estados Unidos, analisaram-se os critérios de elegibilidade de ambos os programas Produtor de Água e CRP, além de indicações de propostas de uso e manejo do solo segundo a aptidão agrícola local, propondo-se, desde modo, adequações no modelo brasileiro de serviços ambientais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado tomando-se por base a bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, com aproximadamente 540 km², situa-se entre as coordenadas 20° 12' S a 20° 28' S e 54° 55' W a 55° 16' W, próxima aos limites dos biomas Cerrado e Pantanal (Figura 1). O Ribeirão Salobra é tributário do Rio Aquidauana, importante curso d'água para suprimento das atividades pesqueira e agrícola na região.

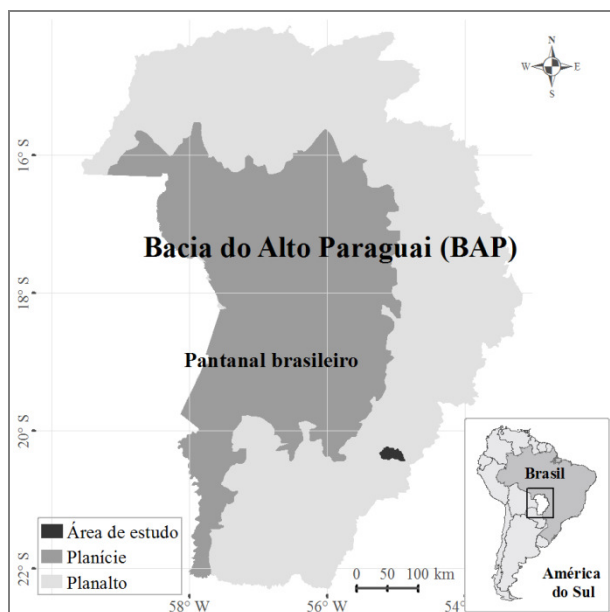


Figura 1. Localização da área de estudo.

A área de estudo está localizada na região de planalto da Bacia do Alto Paraguai (BAP), sendo de considerável relevância ecológica, pois os problemas ambientais da região do Pantanal, em parte, dependem dos processos ocorridos no planalto (Wantzen *et al.*, 2003, 2008). O Pantanal é reconhecido como a maior planície alagável do mundo e é designada como patrimônio nacional pela constituição brasileira (Seidl *et al.*, 2001).

O clima da área de estudo é tropical, transição entre CFA e Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1500 mm e temperatura média anual de 23° C. A altitude do local varia de 200 a 400 metros.

A ocupação da bacia do Ribeirão Salobra é rural, predominando-se a atividade pecuária extensiva e, em menor percentual, apresentam-se culturas lenhosas, como eucalipto e citricultura. A classificação do uso e cobertura do solo foi realizada por meio de imagens Landsat Thematic Mapper (órbita/ponto 225/74) (INPE, 2008).

2.2 Delineamento do estudo

As bases de elegibilidade de aplicação dos programas CRP e Produtor de Água foram simuladas e integradas. Em seguida, foram realizadas indicações de uso e manejo do solo para as regiões elegíveis resultantes (Figura 2).

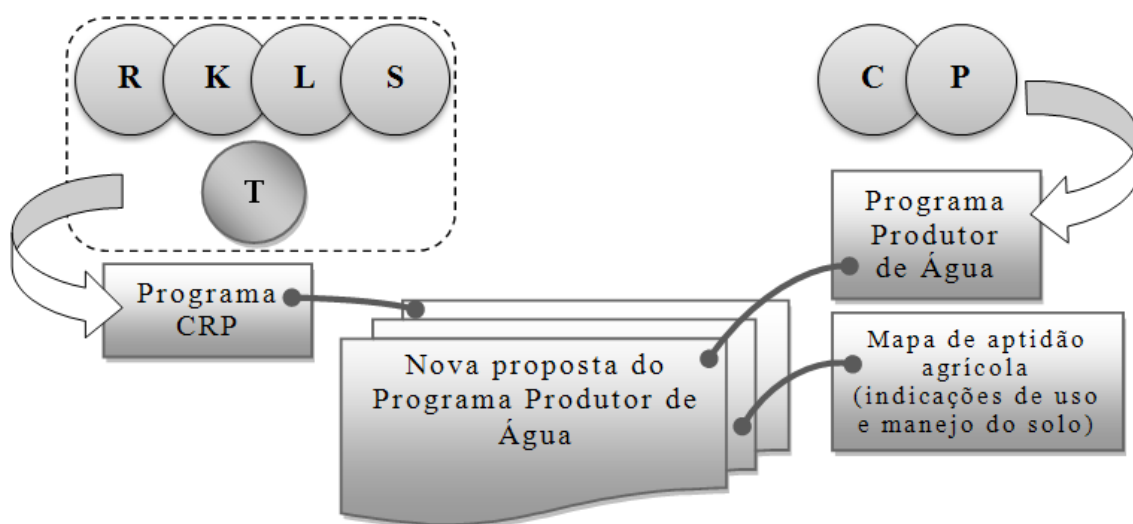


Figura 2. Delineamento do estudo para proposição de adaptações do Programa Produtor de Água

2.3 Modelo USLE

O modelo USLE é mundialmente utilizado visando o planejamento agrícola e ambiental, o qual caracteriza-se por estabelecer estimativas de perda média anual de solo por erosão laminar e em sulcos (Kinnell, 2010). Conforme proposto por Wischmeier & Smith (1978), o modelo integra seis fatores do processo erosivo (eq. 1):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

em que: A = perda média anual de solo por unidade de área ($\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); R = erosividade da chuva ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); K = erodibilidade do solo ($\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); L = comprimento de rampa (m); S = declividade da vertente (%); C = uso e manejo do solo (adimensional); e P = práticas conservacionistas (adimensional).

2.3.1 Fator Erosividade Média Anual - R

Os dados utilizados na obtenção do índice de erosividade foram oriundos de 3 estações pluviográficas, localizadas nos municípios de Campo Grande, Dourados e Coxim. Foram obtidos dados consistidos de 109 estações pluviométricas localizadas no Estado de Mato Grosso do Sul, a partir do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (HidroWeb) (Tabela 1).

Tabela 2. Série de dados analisados

Estações	Período analisado (anos)
Dourados	8
Coxim	4
Campo Grande	3
Agência Nacional de Águas (ANA)	Superior a 15

Apesar das séries históricas estudadas serem inferiores a 20 anos, período mínimo considerado adequado para ser utilizado na estimativa de perda média anual de solo por meio da USLE, vale lembrar que, no Brasil, de modo geral, são raras as séries históricas advindas de pluviógrafos em virtude da deficiente disponibilização pelos órgãos responsáveis (Montebeller *et al.*, 2007).

Os dados das três estações pluviográficas foram utilizados para obtenção de equações de regressão entre o índice de erosividade EI_{30} e o coeficiente de chuvas proposto por Fornier (1956) e modificado por Lombardi Neto (1977). As equações obtidas foram aplicadas a 109 estações pluviométricas, obtendo-se assim os valores EI_{30} . O mapa do índice de erosividade

foi gerado a partir do ajuste ao semivariograma, processo de validação cruzada e aplicação da krigagem ordinária (Montebeller *et al.*, 2007). Assim, o mapa de erosividade resultante foi recortado conforme o limite da área em estudo.

2.3.2 Fator Erodibilidade - K

O fator de erodibilidade (fator K) foi definido a partir de dados de literatura (Tabela 1), conforme as classes de solo presentes na área de estudo (Brasil, 1982).

Tabela 3. Fator erodibilidade conforme a classe de solo

Classes de solo	Fator de K (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)
Latossolo roxo distrófico (LRd)	0,0128*
Latossolo vermelho escuro distrófico (Lea)	0,0175*
Neossolo Quatzarênico Órtico (RQo)	0,0351**

Fonte: Oliveira *et al.* (2007)*; Silva & Álvares (2005)**

2.3.3 Fator topográfico - LS

O fator LS foi gerado a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) advindo da vetorização da base topográfica e processado no software USLE-2D (Desmet & Govers, 1996). O fator L foi obtido por meio da eq. 2 conforme Desmet & Govers (1996).

$$L_{i,j} = [(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}] / [x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22,13)^m] \quad (2)$$

sendo: $L_{i,j}$ = fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j); $A_{i,j}$ = área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) (m²); D = tamanho da grade de células (m); $x_{i,j}$ = valor da direção do fluxo; m = coeficiente dependente da declividade.

O cálculo do fator S baseou-se no algoritmo proposto por Wischmeier & Smith (1978). Assim, o expoente (m) da eq. 3 foi obtido considerando as variações da declividade (Tabela 4).

Tabela 4. Definição do expoente m conforme a declividade

Declividade	Expoente m
$S < 1\%$	0,2
$1\% \leq S \leq 3\%$	0,3
$3\% < S \leq 5\%$	0,4
$S > 5\%$	0,5

Em seguida, utilizou-se a eq. 3, proposta por Wischmeier & Smith (1978), para o cálculo do fator S.

$$S = 65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065 \quad (3)$$

em que: θ = ângulo em graus da encosta.

2.3.4 Tolerância a perda de solo (T)

A tolerância a perda de solo (T) pode ser definida como a máxima taxa de erosão do solo que permite a manutenção de elevada capacidade produtiva, viável economicamente e por longo período de tempo (Wishmeier & Smith, 1978). A qual, se ultrapassada, é considerada inaceitável e deve ser reduzida, por meio de medidas de conservação viáveis (Sparovek & De Maria, 2003; Bühlmann *et al.*, 2010). O valor T foi definido a partir de dados de literatura (Tabela 5), conforme as classes de solo presentes na área de estudo (Boellstorff & Benito, 2005).

Tabela 5. Fator erodibilidade conforme a classe de solo

Classes de solo	T (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Latossolo roxo distrófico (LRd)	13,0*
Latossolo vermelho escuro distrófico (Lea)	15,0*
Neossolo Quatzarênico Órtico (RQo)	6,3**

Fonte: Oliveira *et al.* (2007)*; Oliveira *et al.* (2008)**

2.4 Modelos de aplicação de serviços ambientais

2.4.1 Programa CRP

Os dados de entrada do modelo USLE são compostos por fatores naturais (R, K, L e S) e antrópicos (C e P). A estimativa da perda de solo produzida pelas características inerentes do local é denominada de Potencial Natural de Erosão (PNE). Nos Estados Unidos, o índice de erodibilidade (Erodibility Index – EI) é utilizado como critério de elegibilidade para aplicação do programa de serviços ambientais (CRP). O índice EI representa a relação entre o PNE e a tolerância à perda de solo (eq. 1). Esta relação também indica o risco natural de erosão (Basic *et al.*, 2004; Boellstorff & Benito, 2005; Schiettecatte *et al.*, 2008).

$$EI = PNE/T = R.K.L.S/T \quad (2)$$

sendo: EI = índice Erodibility Index (EI); R= erosividade da chuva (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹); K = erodibilidade do solo (t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹); LS = fator topográfico (adimensional); T = tolerância a perda de solo (t.ha⁻¹.ano⁻¹).

O programa CRP é estabelecido, de modo restritivo, em áreas com valores de EI iguais ou maiores que 8, classificadas como altamente erodíveis (HEL), as demais áreas, por outro lado, são classificadas como Non-HEL. Vale ressaltar que a distribuição das áreas classificadas como HEL integra parte dos critérios para implementação do programa CRP, prevendo-se outros requisitos a serem atendidos pelos usuários dessas áreas para serem contemplados com os incentivos econômicos do programa (USDA-NRSC, 2006).

Analizou a influência dos fatores R, K, L, S e T nos valores resultantes de EI, por meio da aplicação de matriz de correlação linear (ferramenta Band Collection Statistics, ESRI, 2006).

2.4.2 Programa Produtor de Água

O programa Produtor de Água baseia-se em projetos de implantação de medidas de conservação que consideram a redução da erosão decorrente de alterações no uso e cobertura do solo (fatores C e P). Dentre os fatores que compõe o modelo USLE, apenas os fatores C e P constituem a tendência de variação temporal, já que são referentes às ações antrópicas e não são intrínsecos ao local como os fatores R, K, L e S. Assim, estima-se o percentual de abatimento da erosão a partir dos cenários de redução dos fatores C e P, adequando-se o valor de PSA por unidade de área conforme o enquadramento dos percentuais de abatimento da erosão (Chaves *et al.*, 2004; ANA, 2008). Deste modo, a base de aplicação do programa brasileiro de serviços ambientais é definida pelo delineamento de uso do solo.

2.5 Propostas de conservação

As classes de aptidão agrícola são importantes ferramentas no planejamento de uso do solo (Walia *et al.*, 2010; De La Rosa, *et al.*, 2009; Martin & Saha, 2009). A bacia de estudo apresenta as classes de aptidão agrícola expostas na Tabela 6.

Tabela 6. Descrição das classes de aptidão agrícola presente na bacia do ribeirão Salobra

Classificação da aptidão agrícola	Descrição
2(a)BC	Aptidão regular para lavoura nos níveis de manejo B e C e restrita no A
3(a)(b)(c)	Aptidão restrita para lavoura nos níveis de manejo A, B e C
4(p)/5(s)	Aptidão restrita para pastagem plantada e silvicultura

Fonte: Brasil (1997)

O grupo de aptidão agrícola identifica o tipo de utilização mais intensivo das terras, ou seja, sua melhor aptidão. Conforme a classificação proposta por Ramalho & Beek (1995), os grupos 1 a 3 são aptos para lavouras; o grupo 4 é indicado para pastagem plantada; o grupo 5 para silvicultura e pastagem natural; enquanto o grupo 6 deve ser destinado a preservação da natureza. O aumento das limitações da região produz a diminuição das alternativas de uso (Figura 3).

Grupo de Aptidão Agrícola		Aumento da Intensidade de Uso →					
		Preservação de Flora e Fauna	Silvicultura e/ou Pastagem Natural	Pastagem Plantada	Lavouras		
					Aptidão Restrita	Aptidão Regular	Aptidão Boa
Limitações ↓	1						
	2	●				●	
	3	●			●		
	4	●		●			
	5	●	●				
	6						

Figura 3. Alternativas de uso do solo conforme os graus de limitação para cada grupo de aptidão agrícola
Fonte: adaptado de Ramalho & Beek (1995)

A simbologia das classes de aptidão agrícola apresenta letras que acompanham os algarismos e são indicativas das classes de aptidão (boa, regular ou restrita) conforme os níveis de manejo (Tabela 5). Os três níveis de manejo (a, b e c), referem-se à necessidade de diferentes níveis tecnológicos: primitivo, pouco desenvolvido e desenvolvido, respectivamente. Assim, o uso do solo depende dos níveis de manejo considerados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fatores resultantes do modelo USLE e o valor T foram integrados para elaboração do índice EI e posterior classificação de áreas altamente erodíveis (HEL) na bacia de estudo (Figura 4).

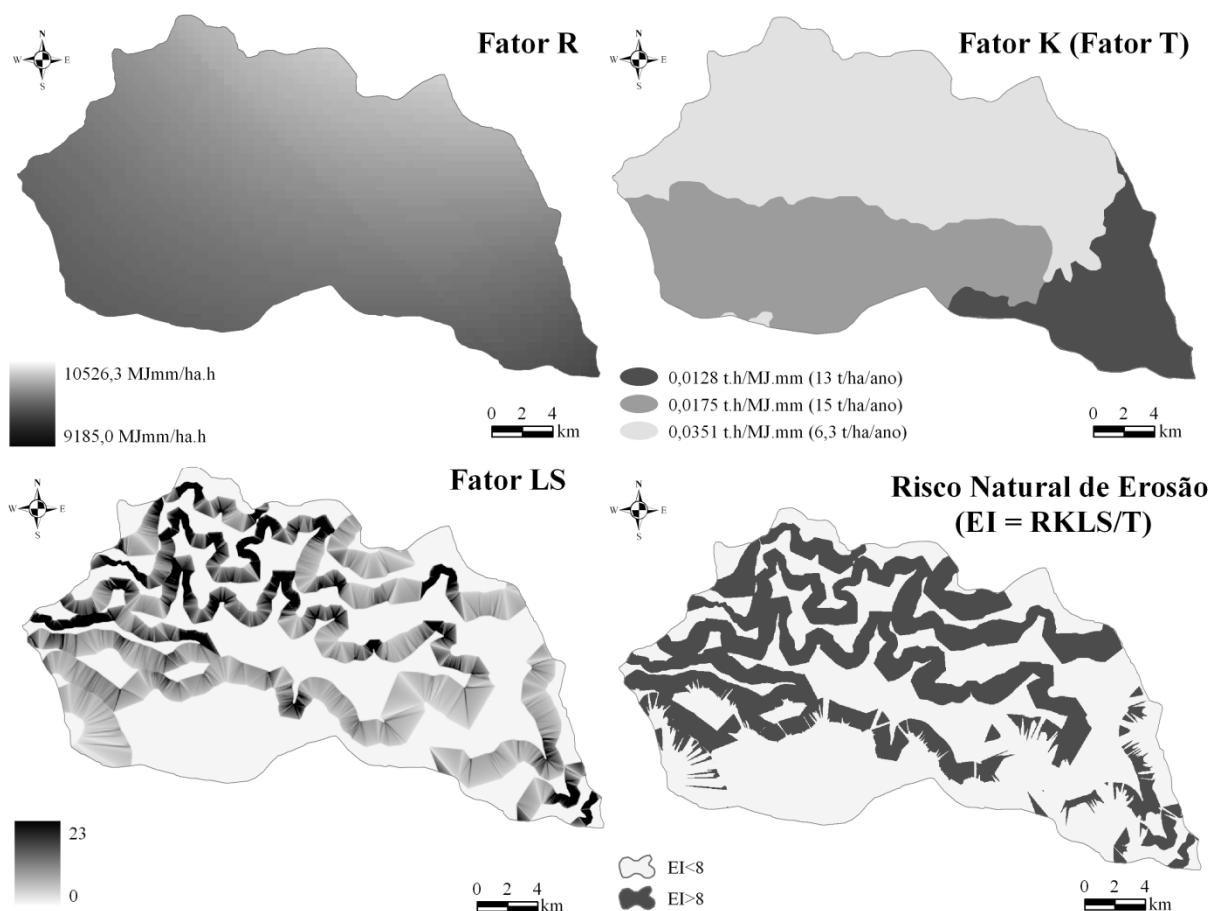


Figura 4. Fatores do modelo USLE e EI resultante da operação desses fatores

Os mapas de valores resultantes de EI e do fator LS apresentam notável semelhança no delineamento das classes de valores. A matriz de correlação linear entre as variáveis EI e o fator LS gerou o coeficiente de correlação (r) igual a 0,94 (ferramenta Band Collection Statistics, ESRI, 2006). Portanto, a topografia constitui significativa influência na determinação das áreas altamente erodíveis, fato também constatado por Weill & Sparovek (2008) e Silva (2008).

O programa CRP contemplou uma parcela da área passível de ser beneficiada pelo programa Produtor de Água, em virtude da priorização de áreas classificadas como altamente erodíveis (Figura 5).

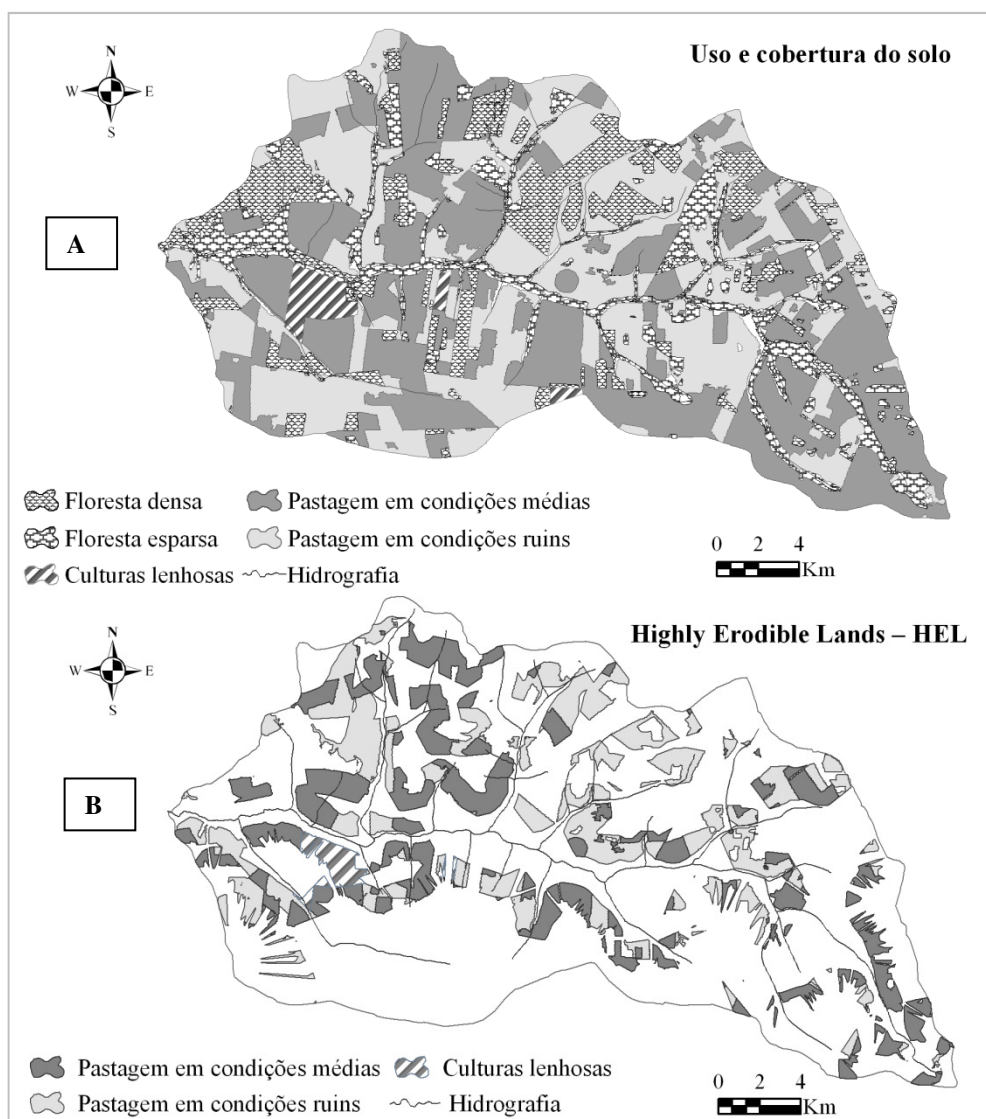


Figura 5. (A) Uso e cobertura do solo; (B) Intersecção entre áreas de HEL (EI>8) e ocupação por pastagem e culturas lenhosas

Constata-se que as áreas de HEL abrangeram apenas 37,8% das áreas ocupadas por atividades agrícolas e 44,4% das áreas de preservação (Tabela 7). Portanto, a definição de uma escala de áreas prioritárias a serem contempladas pelo programa brasileiro de PSA é capaz de integrar o planejamento estratégico de conservação do solo, no qual são priorizadas as áreas classificadas como HEL.

Tabela 7. Distribuição da base de aplicação dos programas de serviços ambientais

Classificação	Uso do solo	CRP		Produtor de água
		Non-HEL	HEL	
Áreas de preservação	Floresta em condições médias	6,6%	6,5%	13,1%
	Floresta em condições ruins	6,5%	4,2%	10,7%
	Água e áreas úmidas	0,8%	0,4%	1,2%
	Total	13,9%	11,1%	25,0%
Ocupação por atividades agrícolas	Pastagem em condições ruins	21,3%	13,6%	34,9%
	Pastagem em condições médias	24,5%	13,8%	38,3%
	Silvicultura	0,8%	0,9%	1,7%
	Total	46,6%	28,3%	74,9%

Após a definição da base de aplicação do programa de PSA, as propostas de uso e manejo do solo devem obedecer às características locais de aptidão agrícola. Essas características apresentam delineamento semelhante ao das classes de solo. Verifica-se que a região leste da bacia estudada apresenta maior aptidão para agricultura, enquanto a parte sul constitui menor aptidão para tal atividades, a parte norte, por sua vez, é inapta para tal. A parte norte possui maior limitação de uso, restringindo-se a atividade pecuária e silvicultura. Analisando-se a distribuição espacial das classes de aptidão agrícola e as áreas classificadas como HEL, nota-se que estas predominam em áreas com menos alternativas de uso. Assim, a maioria dos projetos de PSA na bacia de estudo não será destinada a atividades de agricultura (Figura 6).

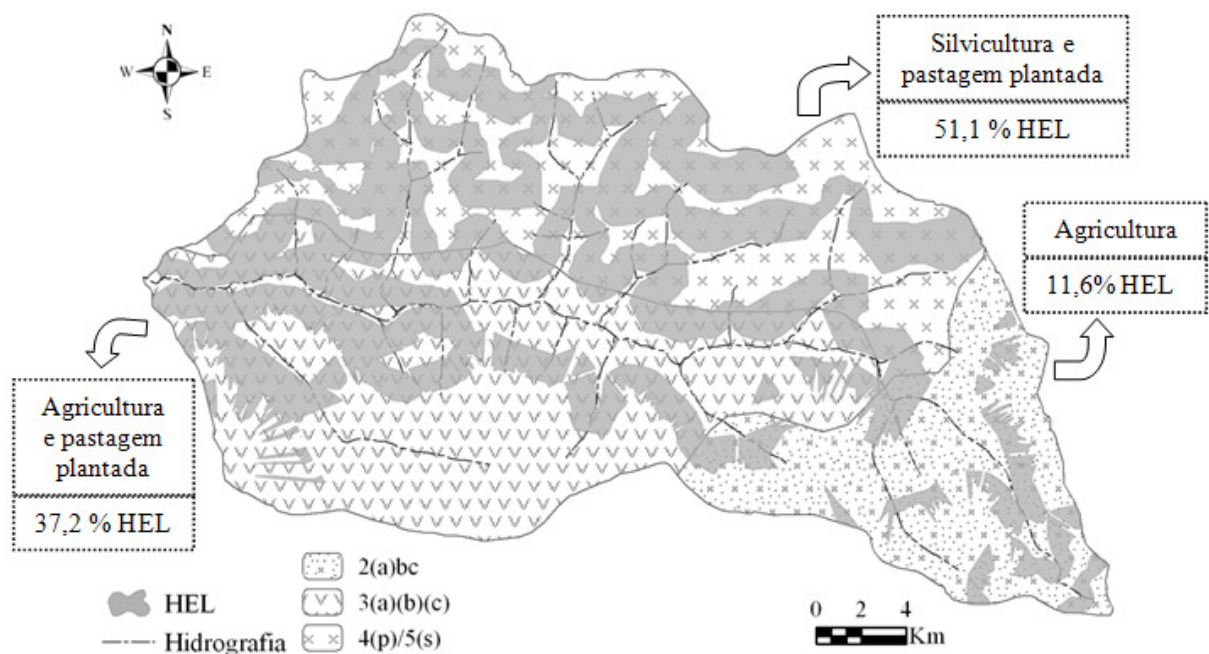


Figura 6. Distribuição das classes de aptidão agrícola e alternativas de uso intensivo do solo para projetos de implantação de PSA dentro das áreas classificadas como HEL

Deste modo, os recursos financeiros destinados a projetos de PSA serão direcionados conforme as características inerentes da área, como recomenda Osipov (2010). O risco natural de erosão, os valores de tolerância a perda de solo e a classificação de aptidão agrícola atuam como importantes ferramentas nesse processo. Portanto, é essencial a estimativa *in situ* dos fatores que integram estes índices, tais como o fator de erodibilidade e tolerância a perda de solo (Li *et al.*, 2009). Além disso, o incremento de pesquisas sobre erosão do solo na região de aplicação do PSA é importante no sentido de estabelecer detalhes das propostas de conservação a serem implantadas, tal como ocorre nos Estados Unidos (Renschler & Harbor, 2002).

4. CONCLUSÕES

A priorização de áreas classificadas como altamente erodíveis para implantação do PSA na bacia de estudo contemplou uma área inferior à metade da área passível de ser beneficiada pelo programa brasileiro de serviços ambientais.

A união de áreas naturalmente propensas a erosão juntamente às restrições advindas da classificação de aptidão agrícola, reduz drasticamente as alternativas de uso do solo, direcionando-as, em grande parte, para a atividade pecuária.

Conforme as adaptações no programa brasileiro de serviços ambientais, os recursos financeiros destinados ao PSA poderão ser direcionados de forma mais eficiente visando o beneficiamento de regiões mais propensas a erosão e adequações no uso e manejo do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Superintendência de Usos Múltiplos, Brasília : ANA, 2008.

ASQUITH, N.M.; VARGAS, M.T.; WUNDER, S. Selling two environmental services: In-kind payments for bird habitat and watershed protection in Los Negros, Bolivia. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.675-684. 2008.

BENNETT, M.T. China's sloping land conversion program: institutional innovation or business as usual?. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.699-711, 2008.

BASIC, F; KISIC, I.; MESIC, M.; NESTROY, O.; BUTORAC, A. Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.197-206, 2004.

BOELLSTORFF, D.; BENITO, G. Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central Spain. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.107,p. 231-243, 2005.

BRASIL – Ministério das Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF.21 Campo Grande: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Levantamento de Recursos Naturais, 28 , 412 p., 1982.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Programa Nacional de Meio Ambiente. **Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai-PCBAP**. Brasília, DF: PNMA, 1997. 3v.

BÜHLMANN, E.; WOLFGRAMM, B.; MASELLI, D.; HURNI, H.; SANGINOV, S.R.; LINIGER, H.P. Geographic information system–based decision support for soil conservation planning in Tajikistan. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.65, p.151-159, 2010.

CHAVES, H.M.L.; BRAGA JR. B.; DOMINGUES. A.F.; SANTOS, D.G. Quantificação dos benefícios ambientais e compensações financeiras do “Programa do Produtor de Água” (ANA): I.Teoria. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.9, n.3, p.5-14 2004.

COSTANZA, R., D’ARGE, R, DE GROOT, R, FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O’NEILL, R.V., PARUEDO, J., RASKIN, R.G., SUTTON, P.,

VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature** 15, 253–260, 1997.

COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R.V., PARUEDO, J., RASKIN, R.G., SUTTON, P., VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Ecological Economics**, v.25, p.3–15, 1998.

DE LA ROSA, D.; ANAYA-ROMERO, M.; DIAZ-PEREIRA, E.; HEREDIA, N.; SHAHBAZI, F. Soil-specific agro-ecological strategies for sustainable land use - A case study by using MicroLEIS DSS in Sevilla Province (Spain). **Land Use Policy**, v.26, n.4, p.1055-1065, 2009.

DESMET, P.J.J; GOVERS, G. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.51, n.5, p. 427-433, 1996.

DOBBS, T.L.; PRETTY, J. Case study of agri-environmental payments: the United Kingdom. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.766-776, 2008.

ENGEL, S.; PAGIOLA, S.; WUNDER, S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an overview of the issues. **Ecological Economics**, n.65, n.4, p.663-674, 2008.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc. **ArcGIS Professional GIS for the desktop**, version 9.2. ESRI, Redlands, U.S, 2006.

FOURNIER, F. The effect of climatic factors on soil erosion estimates of solids transported in suspension in runoff. **Association Hydrologic Int. Public**, 1956, 6p.

FSA - Food Security Act of 1985. United States, Public Law 99 – 198, **Title XII: Conservation. 99 Stat.** 1504, 23 de dezembro de 1985.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. **Imagem LANDSAT 5 Thematic Mapper (TM)**, canais 1, 2 ,3 ,4, 5, 6, 7, órbita 225, ponto 74, de 18 dezembro 2008. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em: 17 Mar 2009.

KINNELL, P.I.A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. **Journal of Hydrology**, v.385, n.1-4, p.384-397, 2010.

KOSOY, N.; MARTINEZ-TUMA, M.; MURADIAN, R.; MARTINEZ-ALIER, J. Payments for environmental services in watersheds: Insights from a comparative study of three cases in Central America. **Ecological Economics**, v.61, n.2-3, p.446-455, 2007.

LANT, C.L.; KRAFT, S.E.; BEAULIEU, J.; BENNETT, D.; LOFTUS, T.; NICKLOW J. Using GIS-based ecological-economic modeling to evaluate policies affecting agricultural watersheds. **Ecological Economics**, v. 55, n.4, p.467-484, 2005.

LI, L.; DU, S.; WU, L.; LIU, G. An overview of soil loss tolerance. **Catena**, v.78, p.93-99, 2009.

LOMBARDI NETO, F. **Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil.** 1977. 53 f. Thesis (M.Sc.) - Purdue University, West Lafayette, 1977.

MARTIN, D.; SAHA, S.K. Land evaluation by integrating remote sensing and GIS for cropping system analysis in a watershed. **Current Science**, v. 96, n.4, p.569-575, 2009.

- MONTEBELLER, C.A.; CEDDIA, M.B.; CARVALHO, D.F.; VIEIRA, S.R.; FRANCO, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do rio de Janeiro. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.426-435, 2007.
- MUÑOZ-PIÑA, C.; GUEVARA, A.; TORRES, J.M.; BRAÑA, J. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.725-736, 2008.
- OLIVEIRA, A.; PINTO, S.; LOMBARDI NETO, F. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo preditivo. **Estudos Geográficos**, v.5, n.1, p.63-86, 2007.
- OLIVEIRA, F.P. de; SANTOS, D.; SILVA, I. de F.; SILVA, M.L.N. Tolerância de Perda de Solo por Erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v.8, n.2, p.60-71, 2008.
- OSIPOV, V. Natural risk management. **Herald of the Russian Academy of Sciences**, v.80, n.2, p.119-124, 2010.
- PAGIOLA, S. Payments for environmental services in Costa Rica. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.712-724, 2008.
- PAGIOLA, S.; ARCENAS, A.; PLATAIS, G. Can payments forenvironmental services help reduce poverty? An exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. **World Development**, v.33, n.2, p.237-253, 2005.
- PIMENTEL D.; HARVEY C.; RESOSUDARMO P.; SINCLARE K.; KURZ D.; MCNAIR M.; CRIST S.; SHPRITZ L.; FITTON L.; SAFFOURI R.; BLAIR R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v.267, n.5201, p.1117-1123, 1995.
- POSTEL, S.L.; THOMPSON, B.H. Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services. **Natural Resources Forum**, v.29, n.2, p.98-108, 2005.
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 65p. 1995.
- RENSCHLER, C.S.; HARBOR, J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation. **Geomorphology**, v.47, p.189-209, 2002.
- SCHIETTECATTE W, D'HONDT L, CORNELIS WM, ACOSTA ML, LEAL Z, LAUWERS N, ALMOZA Y,ALONSO GR, DÍAS J, RUÍZ M, GABRIELS D. Influence of landuse on soil erosion riskin the Cuyaguaje watershed (Cuba). **Catena**, v.74, p.1-12, 2008.
- SEIDL, A.F.; SILVA, J.S.V.; MORAES, A.S. Cattle ranching and deforestation in the Brazilian Pantanal. **Ecological Economics**. v.36, n.3, p.413-425, 2001.
- SILVA, A.M.; ALVARES, C.A. Erodibilidade dos solos paulistas: levantamento de informações e estruturação de um banco de dados. **Geociências**, v.24, n.1, p.33-41, 2005.
- SILVA, A.M. Potencial Natural de Erosão no Município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v.8, n.1, p.5-13, 2008.
- SPAROVEK, G, DE MARIA, I.C. Multiperspective analysis of erosion tolerance. **Scientia Agrícola**, v.60, n.2, p.409-416, 2003.

URI, N.D.; LEWIS, J.A. The dynamics of soil erosion in US agriculture. **The Science of The Total Environment**, v.218, n.1, p.45-58, 1998.

USDA – United States Department of Agriculture. **Agricultural Statistics 2008**. Government Printing Office, Washington DC, 2008.

USDA-NRCS (United States Department of Agriculture - National Resources Conservation Service). **National Food Security Act Manual (NFSAM): Highly Erodible Determinations**. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 4.ed., Parte 511, p.1–22, Washington, DC, 2006.

WALIA, C.S.; SINGH, S.P.; DHANKAR, R.P.; RAM, J.; KAMBLE, K.H.; KATIYAR, D.K. Watershed characterization and soil resource mapping for land use planning of Moolbari watershed, Shimla District, Himachal Pradesh in Lesser Himalayas. **Current Science**, v.98, n.2, p.176-182, 2010.

WANTZEN, K.M. Cerrado streams – characteristics of a threatened freshwater ecosystem type on the Tertiary Shields of Central South America. **Amazoniana**, v.17, n.3-4, p.481-502, 2003.

WANTZEN, K.M.; SANTOS, S.A.; DA CUNHA, C.N.; JUNK, W.J.; GIRARD, P.; ROSSETTO, O.C.; PENHA, J.M.; COUTO, E.G.; BECKER, M.; PRIANTE, G.; TOMAS, W.M.; SANTOS, S.A.; MARTA, J.; DOMINGOS, I.; SONODA, F.; CURVO, M.; CALLIL, C. Towards a sustainable management concept for ecosystem services of the Pantanal wetland. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.8, n.2-4, p.115-138, 2008.

WEILL, M.A.M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p. 801-814, 2008.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses**. A guide to conservation planning. Washington: USDA Agriculture Handbook, n. 537, 58p. 1978.

WUNDER, S.; ALBÁN, M. Decentralized payments for environmental services: the cases of Pimampiro and PROFAFOR in Ecuador. **Ecological Economics**, v.65, n.4, p.685-698, 2008.

WUNDER, S. The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation. **Conservation Biology**, v.21, n.1, p.48-58, 2007.

CAPÍTULO 2

Nova abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais II: avaliação hidrológica de propostas de conservação ambiental

Resumo: O programa brasileiro de serviços ambientais, denominado Produtor de Água, baseia-se em alterações do uso e manejo do solo para aplicação de incentivos econômicos visando à conservação do solo e água. As propostas são avaliadas quanto à redução da erosão, mediante o emprego da Universal Soil Loss Equation (USLE). Este trabalho propõe a quantificação de benefícios hidrológicos advindos de tais propostas, por meio do modelo hidrológico runoff Curve Number (CN). Para tanto, avaliou-se o efeito de três cenários de alterações positivas no uso do solo quanto à redução da erosão e do escoamento superficial, tomando-se por base uma bacia hidrográfica rural próxima ao Pantanal brasileiro. Verificou-se o Percentual de Abatimento da Erosão (PAErosão), o Percentual de Abatimento do Escoamento (PAEscoamento) e a variação do parâmetro CN, resultantes de cada cenário simulado. Os índices PAErosão, PACN e PAEscoamento conduziram a semelhante avaliação dos cenários, indicando que o cenário Pastagem é vantajoso em relação ao cenário Floresta. Verifica-se, portanto, a compatibilidade de tais modelos como ferramentas para avaliação dos efeitos de medidas de conservação. No entanto, o método CN é vantajoso em relação ao modelo USLE, pois a calibração do parâmetro CN é facilitada em relação aos fatores C e P. É importante analisar a relevância do projeto de conservação no contexto da bacia hidrográfica. O que deve conduzir a uma maior participação de usuários da bacia e o estabelecimento de metas progressivas de conservação do solo e dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Serviços hidrológicos, poluição difusa, políticas agro-ambientais

Abstract: The Brazilian program of environmental services is based on changes in soil use and management for application of economic incentives for soil and water conservation. Proposals are evaluated based on the erosion reduction by the Universal Soil Loss Equation (USLE). This paper proposes a quantification of hydrological benefits of conservation proposals, through the hydrological model runoff Curve Number (CN). We studied the effect of three land use scenarios in erosion and runoff reduction on a rural watershed near the Brazilian Pantanal. We analyzed the percentage of erosion reduction, the percentage of runoff reduction and the variation of parameter CN from each scenario. The results showed that the pasture recovery scenario is better than other scenarios studied. The CN method is advantageous over USLE model, because the calibration of parameter CN is easier than factors C and P. It is important to analyze the relevance of the conservation project in the context of the watershed. This can lead to greater participation of watershed users and to establish the progressive goals of soil and water conservation.

Keywords: Hydrological Services, diffuse pollution, agri-environmental policies

1 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica ameaça a produtividade vegetal nas áreas de drenagem e a disponibilidade dos recursos hídricos. Assim, as ações de controle efetivo da perda de solo em bacias hidrográficas favorecem a conservação do solo e o incremento da oferta de água.

A contínua queda da qualidade do solo e da produção agrícola, decorrente da erosão acelerada, compromete o suprimento de alimentos da crescente população mundial (Pimentel *et al.*, 1995). De modo a reduzir ou evitar as externalidades negativas das atividades agrícolas em bacias hidrográficas, os usuários da água a jusante podem contribuir voluntariamente para o custeio de práticas de conservação promovidas pelos produtores rurais a montante, tendo uma instituição governamental como intermediária de tal relação (Kosoy *et al.*, 2007). O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) apóia-se no princípio do provedor-recebedor, em substituição ao tradicional poluidor-pagador (Engel *et al.*, 2008). Em diversas cidades dos Estados Unidos, os investimentos em conservação do solo e preservação de florestas em bacias hidrográficas revelam-se financeiramente vantajosos, em virtude de abatimentos nos custos de processos de tratamento de água para fins de potabilidade (Postel & Thompson, 2005). Além dos benefícios off-site de tais investimentos, constata-se, também, vantagens econômicas no incremento da produtividade on-site (Sharda *et al.*, 2010).

O PSA deve estar associado a ferramentas de suporte científico para quantificação acurada e viável dos benefícios dos serviços ambientais (Yang *et al.*, 2010). Atualmente, o número de sistemas de PSA no mundo, bem como pesquisas e avaliação de projetos piloto ainda são limitados (Zabel & Roe, 2009). A integração de conceitos, métodos, experiências e a consideração de peculiaridades locais podem gerar relevantes políticas de serviços ambientais (Lele, 2009). Os serviços ambientais oferecidos por bacias hidrográficas podem ser mensurados por medidas de escoamento superficial, vazão de cursos d'água, erosão do solo e produção de sedimentos (Pattanayak, 2004).

No Brasil, o programa de serviços ambientais, denominado Produtor de Água, propõe incentivos financeiros proporcionais aos benefícios relativos à redução da erosão advinda da alteração de uso e manejo do solo e implantação de práticas de conservação. Os recursos do programa destinam-se ao financiamento parcial ou total dos custos adicionais de execução dos projetos de conservação (Chaves *et al.*, 2004; ANA, 2008). As propostas de mudança de uso do solo são avaliadas quanto à redução da erosão, mediante o emprego do modelo Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978).

A ocorrência dos processos erosivos está diretamente relacionada aos fenômenos de escoamento superficial e infiltração. O modelo hidrológico runoff Curve Number (CN) (SCS, 1956; USDA, 1986) pode ser empregado na avaliação de propostas de conservação de bacias hidrográficas (Ebrahimian *et al.*, 2009). Tanto o método CN quanto o USLE são amplamente aplicados devido a sua simplicidade e flexibilidade, além de ambos considerarem as características físicas das bacias hidrográficas, como tipo de solo, uso do solo e condições climáticas (Mishra *et al.*, 2006, Tyagi *et al.* 2008).

Buscando-se propor modificações no programa brasileiro de serviços ambientais, este trabalho propõe a quantificação dos benefícios hidrológicos decorrentes de projetos de conservação do solo e água, visando, deste modo, o estabelecimento de valores de PSA proporcionais à redução do escoamento superficial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado tomando-se por base a bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, com aproximadamente 540 km², localizada entre as coordenadas 20° 12' S a 20° 28' S e 54° 55' W a 55° 16' W (Figura 1). O Ribeirão Salobra é tributário do Rio Aquidauana, importante curso d'água para suprimento das atividades pesqueira e agrícola na região.

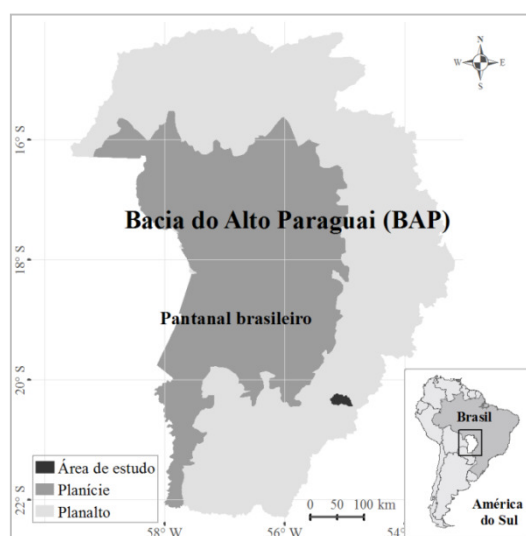


Figura 1. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada na região de planalto da Bacia do Alto Paraguai (BAP), sendo de considerável relevância ecológica, pois os problemas ambientais da região

do Pantanal, em parte, dependem dos processos ocorridos no planalto (Wantzen *et al.*, 2003, 2008). O Pantanal é reconhecido como a maior planície alagável do mundo e é designada como patrimônio nacional pela constituição brasileira (Seidl *et al.*, 2001).

O clima da área de estudo é uma transição entre CFA e Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1500 mm e temperatura média anual de 23° C. A altitude do local varia de 200 a 400 metros e a declividade média é de aproximadamente 2%.

A ocupação da área de estudo é eminentemente rural, predominando-se a atividade pecuária extensiva (cerca de 73% da área total) e, em menor percentual, áreas de cultura lenhosa, como eucalipto e citricultura (Tabela 1). A classificação de uso e cobertura do solo foi realizada com base na imagem Landsat Thematic Mapper (TM) (órbita/ponto 225/74) (INPE, 2008).

Tabela 1. Atual distribuição do uso do solo

Classe de uso do solo	Área	Percentual da Área
Floresta densa	7093 ha	13,1%
Floresta esparsa	5799 ha	10,7%
Pastagem em condições ruins	18874 ha	34,9%
Pastagem em condições médias	20680 ha	38,3%
Água	142 ha	0,3%
Áreas úmidas	528 ha	1,0%
Cultura lenhosa	928 ha	1,7%

Conforme a classificação definida pela tabela convencional do método CN (USDA, 1986), as pastagens em condições ruins foram definidas na condição de cobertura vegetal inferior a 50%. As pastagens em condições médias, por outro lado, constituem cobertura vegetal ocupando entre 50 a 75% da superfície. A floresta densa caracteriza-se por abranger vegetação em estágio avançado, tendo o solo coberto por serrapilheira. Tais condições, em níveis intermediários e mínimos, foram adotadas para áreas de floresta esparsa e cultura lenhosa, respectivamente.

2.2 Determinação de cenários de mudanças de uso e cobertura do solo

Buscando-se propor modificações no programa brasileiro de serviços ambientais, foram aplicados três modelos de avaliação de propostas de conservação do solo e água, nos quais realizaram-se estimativas do Percentual de Abatimento da Erosão (PAErosão), do

Percentual de Abatimento do Escoamento (PAEscoamento) e da variação do parâmetro CN, a partir da aplicação dos modelos USLE e CN, respectivamente. Tendo em vista o estabelecimento gradativo de práticas que favoreçam a conservação do solo e da água na bacia hidrográfica em estudo, foram aplicados cenários que consideram a evolução dos atuais usos do solo (Figura 2). Os cenários propostos foram analisados no contexto local e da bacia hidrográfica em estudo.

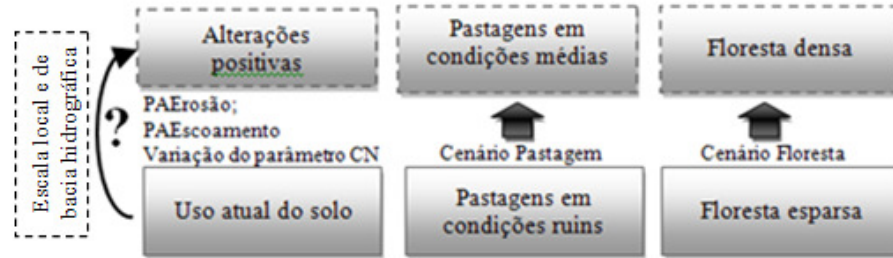


Figura 2. Cenários de mudança de uso do solo na bacia em estudo

O cenário Pastagem considera a execução de atividades de recuperação de pastagens em condições ruins, convertendo estas áreas para condições médias. O cenário de Floresta, por sua vez, institui o adensamento de florestas em áreas de floresta esparsa.

2.3 Redução da erosão

O modelo de erosão USLE, desenvolvido por Wischmeier & Smith (1978), envolve os principais fatores de influência no processo erosivo de origem hídrica, sendo representado pela eq. 1.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

em que: A = perda de solo média anual (ton/ha.ano); R = erosividade da chuva (MJ mm/ha h); K = erodibilidade do solo (t.ha.h/ha.MJ.mm), LS = fator topográfico (adimensional), C = fator de uso e manejo do solo (adimensional), e P = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Dentre os fatores que compõe o modelo USLE, apenas os fatores C e P constituem tendência a variação temporal, já que são referentes às ações antrópicas e não são inerentes ao local como os fatores R, K, L e S. Assim, os cenários de implantação de medidas de conservação foram avaliados conforme a eq. 2.

$$PAErosão(\%) = 100(1 - \frac{A_{final}}{A_{inicial}}) = 100(1 - \frac{C.P_{final}}{C.P_{inicial}}) \quad (2)$$

em que: $PA_{\text{erosão}}$ = Percentual de Abatimento da Erosão; A_{final} = perda de solo após a implantação do projeto de conservação; A_{inicial} = perda de solo antes da implantação do projeto de conservação; $C.P_{\text{final}}$ = produto dos fatores C e P após a implantação do projeto de conservação; $C.P_{\text{inicial}}$ = produto dos fatores C e P antes da implantação do projeto de conservação.

Os valores dos fatores C e P para diferentes usos e manejos, convencionais e conservacionistas, foram obtidos por diversos pesquisadores brasileiros e encontram-se listados no Manual Operativo do Programa Produtor de Água (ANA, 2008) (Tabela 2).

Tabela 2. Fatores C e P para os atuais usos do solo e suas modificações em cada cenário simulado

Atual uso do solo	CP_{inicial}	Cenário	Alterações no atual uso do solo	CP_{final}
Floresta densa	0,01	-	-	0,01
Floresta esparsa	0,03	Floresta	Floresta densa	0,01
Pastagem em condições ruins	0,25	Pastagem	Pastagem em condições médias	0,12
Pastagem em condições médias	0,12	-	-	0,12
Água e áreas Úmidas	0,00	-	-	0,00
Cultura Lenhosa	0,37	-	-	0,37

Fonte: Chaves *et al.* (2004)

Conforme o programa Produtor de Água, as alterações dos fatores CP em nível local definem o PSA a ser efetuado na área contemplada pelo programa (Chaves *et al.*, 2004). Então, os valores resultantes de $PA_{\text{erosão}}$, obtidos localmente, foram enquadrados na Tabela 3, para estimativa do PSA referente a cada cenário simulado.

Tabela 3. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) em função do Percentual de Abatimento de Erosão ($PA_{\text{erosão}}$)

$PA_{\text{erosão}}$	25-50%	51-75%	76-100%
PSA	R\$50/ha	R\$75/ha	R\$100/ha

Fonte: Chaves *et al.* (2004)

2.4 Redução do escoamento

O método CN é um modelo semi-empírico utilizado para estimar o escoamento superficial decorrente de eventos individuais de precipitação. O modelo considera o balanço hídrico exposto na eq.3 e hipótese de que a razão entre a atual e potencial de retenção é igual à razão entre o atual e potencial escoamento superficial (eq.4) (SCS, 1956; USDA, 1986; Yu, 1998). Os principais parâmetros para predição do escoamento superficial pelo método CN são

o potencial máximo de retenção (S) e a abstração inicial (Ia) (eqs. 5 a 7) (Elhakeem & Papanicolaou, 2009; USDA, 1986).

$$P = Ia + F + Q \quad (3)$$

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (4)$$

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \text{ se } P > Ia, \text{ caso contrário } Q=0 \quad (5)$$

$$Ia = \lambda S \quad (6)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

em que: P = precipitação total (mm); Ia = abstração inicial (mm); F = infiltração total; Q = escoamento total (mm); S = potencial máximo de retenção no solo, após o início do escoamento superficial (mm); λ = razão de abstração inicial (adimensional); e CN = número da curva de escoamento (adimensional).

O grau de contribuição da bacia hidrográfica para a geração do escoamento superficial direto depende, sobretudo, do parâmetro S (Mishra & Singh, 2004). O parâmetro abstração inicial da precipitação (Ia) é definido como parte da precipitação que sofre interceptação na cobertura vegetal, infiltração no solo e acumulação em depressões do terreno, ou seja, é o total precipitado entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial (Shi *et al.*, 2009), sendo linearmente relacionado com o parâmetro S (Gabellani *et al.*, 2008). O método CN pressupõe $Ia = 0,2S$ (USDA, 1986).

O parâmetro CN define, mediante um valor numérico, o potencial de produção de escoamento superficial. A atribuição dos valores de CN é proveniente de tabelas (USDA, 1986) que relacionam características físicas da bacia hidrográfica, tais como: grupo hidrológico do solo, uso e cobertura do solo, além da condição de umidade antecedente (Soulis *et al.*, 2009).

As classes de solo presentes na bacia em estudo são: Latossolo Vermelho Escuro Álico, Neossolo Quartzarênico Álico e Latossolo Roxo Distrófico (Brasil, 1982). Os dois primeiros foram classificados como referentes ao grupo hidrológico A e o último como pertencente ao grupo hidrológico B, conforme as características definidas método CN (NRCS, 2004) (Figura 3).

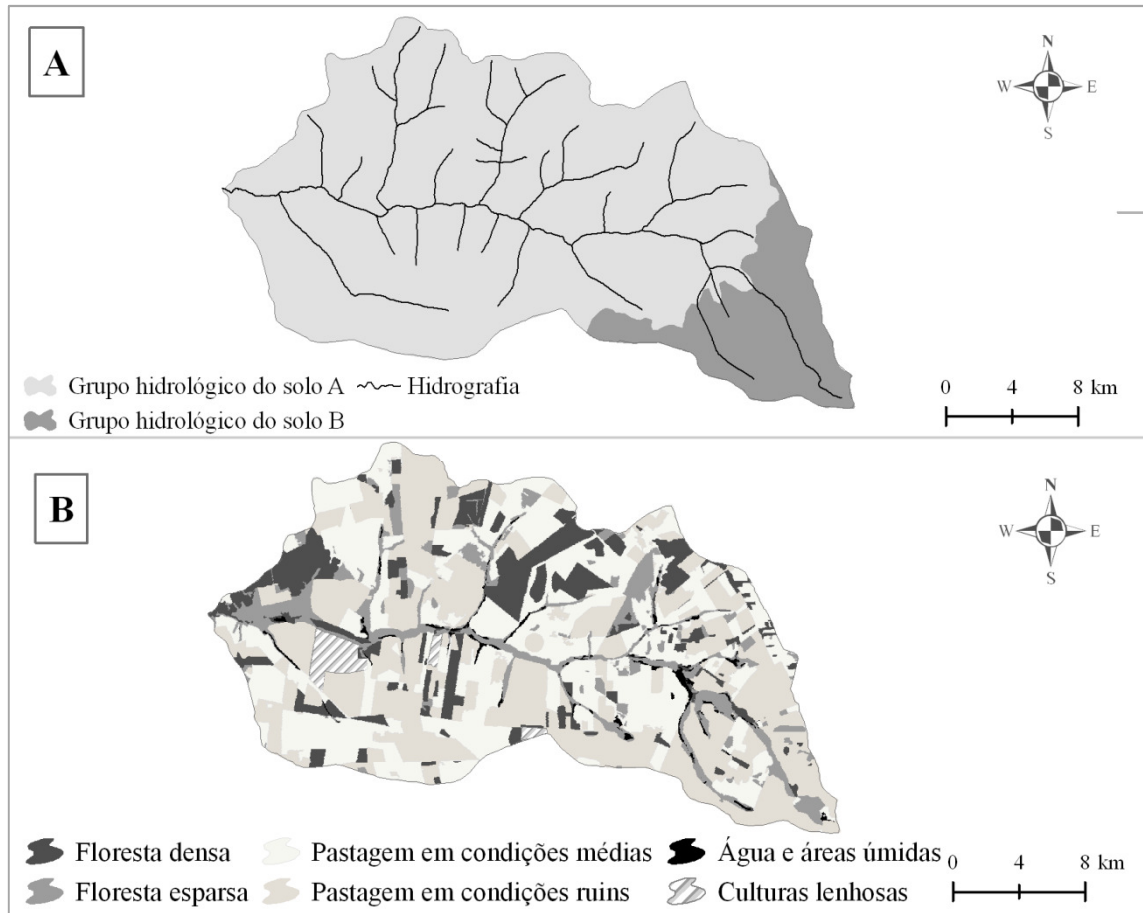


Figura 3. A) Grupo hidrológico do solo; B) atual uso e cobertura do solo na bacia em estudo

Os valores de CN foram determinados de acordo com as classes de uso e cobertura do solo atual (Figura 3) e as previstas nos cenários propostos, bem como as especificações padronizadas pelo método CN (USDA, 1986) (Tabela 4). Estudos anteriores não constataram diferenças significativas nos valores resultantes de escoamento superficial advindos de ajustes do parâmetro CN com a declividade (Huang *et al.*, 2006; Ebrahimian *et al.*, 2009).

Tabela 4. Valores de CN atribuídos em cada cenário na área de estudo conforme os grupos hidrológicos

Atual uso do solo	CN _{inicial} (Grupo hidrológico do solo)	Cenário	Alterações no atual uso do solo	CN _{final} (Grupo hidrológico do solo)
Floresta densa	30 (A) 55 (B)	-	-	30 (A) 55 (B)
Floresta esparsa	36 (A) 60 (B)	Floresta	Floresta densa	30 (A) 55 (B)
Pastagem em condições ruins	68 (A) 79 (B)	Pastagem	Pastagem em condições médias	49 (A) 69 (B)
Pastagem em condições médias	49 (A) 69 (B)	-	-	49 (A) 69 (B)
Água e áreas Úmidas	0 (A;B)	-	-	0 (A;B)
Cultura lenhosa	45 (A) 66 (B)	-	-	45 (A) 66 (B)

Os efeitos dos cenários de implantação de medidas de conservação foram avaliados mediante a variação do parâmetro CN referentes às condições anteriores e posteriores aos projetos de conservação (eq. 8).

$$PACN(\%) = 100(1 - \frac{CN_{final}}{CN_{inicial}}) \quad (8)$$

em que: PACN = Percentual de Abatimento do parâmetro CN; CN_{final} = parâmetro CN após a implantação do projeto de conservação; CN_{inicial} = parâmetro CN antes da implantação do projeto de conservação.

Os cenários propostos também foram analisados por meio da estimativa do Percentual de Abatimento do Escoamento superficial (PAEscoamento) (eq. 9). Os eventos pluviométricos selecionados ocorreram em dezembro de 2008 e janeiro de 2009 (estação chuvosa) e abrange um total de 27,25, 41,0 e 76,0 mm. O qual é considerado extremo de modo a garantir a realização do escoamento superficial em maior parte da bacia em estudo. Adotou-se a condição de umidade antecedente tipo II (SCS, 1993).

$$PAEscoamento(\%) = 100(1 - \frac{Q_{final}}{Q_{inicial}}) \quad (9)$$

em que: PAEscoamento = Percentual de Abatimento do Escoamento superficial; Q_{final} = escoamento superficial após a implantação do projeto de conservação (mm); Q_{inicial} = escoamento superficial antes da implantação do projeto de conservação (mm).

O método CN foi aplicado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) (ESRI, 2006; Tiburcio, 2005). sendo, o mapa de valores de CN da área de estudo foi utilizado para as estimativas de escoamento superficial direto na forma distribuída (Grove *et al.*, 1998).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos dois cenários propostos foi realizada mediante diferentes modelos de quantificação de serviços ambientais, em nível local e na bacia de estudo (Tabela 5). Os resultados foram analisados tomando-se por base os cenários, os modelos de avaliação e a valoração do PSA.

Tabela 5. Percentual de alteração das variáveis para cada cenário simulado

Padrão espacial	Modelo de avaliação	Cenário pastagem	Cenário Floresta
Local (considera somente o percentual de alteração das variáveis)	PAErosão	52,0%	27,7%
	PACN		
	Grupo hidrológico do solo A	27,9%	16,7%
	Grupo hidrológico do solo B	12,7%	8,3%
Global (considera o percentual de alteração das variáveis na bacia de estudo)	PAErosão	31,5%	1,5%
	PACN	11,5%	1,1%
	PAEscoamento	69,1±9%	0,8±1%

* Metodologia convencional do programa brasileiro de serviços ambientais

3.1 Cenários de mudança de uso e cobertura do solo

No cenário Pastagem é proposta a recuperação das áreas de pastagens degradadas, estabelecendo-se o aumento das áreas de pastagem em condições médias. Já no cenário Floresta objetivou-se a conversão de florestas esparsas em florestas densas. As respostas a estas alterações de uso do solo na bacia hidrográfica revelam que o processo de adensamento de florestas produz reduções de perda de solo e água inferiores a execução de recuperação de pastagens degradadas (tabela 6).

Tabela 6. Resposta em relação a cada percentual de alteração no uso do solo

Simulações	Alteração do uso do solo (% da bacia de estudo)	Resposta em relação a cada percentual de alteração no uso do solo		
		PAErosão (%) / alteração do uso do solo (%)	PACN (%) / alteração do uso do solo (%)	PAEscoamento (%) / alteração do uso do solo (%)
Cenário Pastagem	34,90	0,9	0,3	2,0
Cenário Floresta	10,70	0,1	0,1	0,1

Portanto, tendo em vista a minimização da perda de solo e água, a recuperação das pastagens degradadas existentes (cenário Pastagem) mostra-se vantajosa em relação ao cenário de adensamento de florestas esparsas (cenário Floresta). Sparovek *et al.* (2007) confirma que as pastagens normalmente são associadas a menores problemas causados pela erosão devido ao fato de serem eficientes coberturas do solo, controlando as erosões em sulco e entre-sulcos.

Os cenários foram analisados comparativamente com relação ao potencial erosivo e de escoamento superficial. Entretanto, as florestas caracterizam-se por oferecer outros serviços ambientais, como a conservação da biodiversidade, contribuição para a qualidade do ar e do solo (Jose, 2009). Além disso, as florestas estão diretamente relacionadas ao rendimento econômico de atividades agrícolas, em razão da função exercida pelos polinizadores (Ricketts *et al.*, 2004).

3.2 Modelos de avaliação de cenários de mudança de uso e cobertura do solo

Os índices PAErosão, PACN e PAEscoamento apresentam distintos valores absolutos quanto a redução de processos erosivos e de escoamento superficial, o que é explicado pela correlação linear não significativa entre o parâmetro CN e o produto dos fatores C e P (Figura 4). Nota-se que para cada valor do produto C e P ocorrem dois valores de CN, em razão da especificação dos grupos hidrológicos do solo, inclusa na determinação do valor de CN.

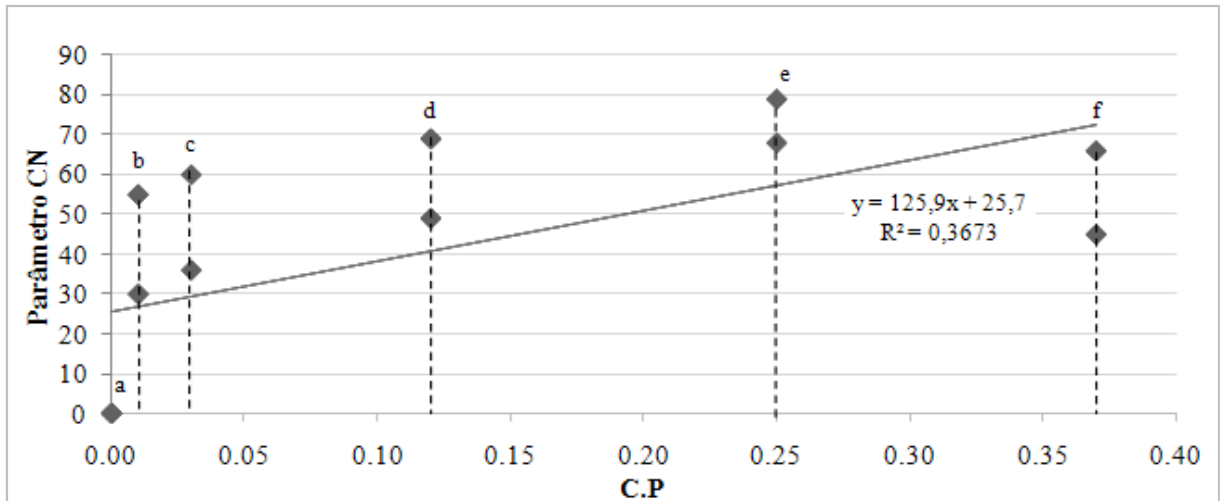


Figura 4. Correlação entre o parâmetro CN e o produto dos fatores C e P. Linhas pontilhadas representam: a) água e áreas úmidas; b) Floresta densa; c) Floresta esparsa; d) Pastagem em condições médias; e) Pastagem em condições ruins; f) Culturas lenhosas

Os índices PAErosão, PACN e PAEscoamento conduziram a semelhante avaliação dos cenários, indicando que o cenário Pastagem é vantajoso em relação cenário Floresta. Verifica-se, portanto, a compatibilidade de tais modelos como ferramentas para avaliação dos efeitos de medidas de conservação. No entanto, o método CN é vantajoso em relação ao modelo USLE, pois a calibração do parâmetro CN é facilitada em relação aos fatores C e P. Diversos autores propõem a estimativa do parâmetro CN para bacias hidrográficas, por meio séries históricas de precipitação e vazão (Hawkins *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2009), e para locais específicos, através de medidas com simulador de chuvas (Elhakeem & Papanicolaou, 2009). Por outro lado, os fatores C e P são obtidos com dados de parcelas padrão (22 m de comprimento e 9% de declividade) da USLE e séries históricas de dados pluviográficos (Wischmeier & Smith, 1978; Kinnell, 2010). Portanto, considerando-se a relativa facilidade de estimativa do parâmetro CN, a utilização deste parâmetro apresenta maior viabilidade de aplicação em bacias hidrográficas no território brasileiro.

Além disso, é relevante a utilização de bacias hidrográficas como escala de aplicação do programa brasileiro de serviços ambientais, tornando-se imprescindível a análise da efetividade do projeto de conservação no contexto da bacia hidrográfica (Tefera & Sterk., 2010). O que permite o estabelecimento de metas progressivas de abatimento do escoamento superficial para toda a bacia, de modo a se desenvolver programas de ações gradativas de conservação (Chaves *et al.*, 2004). Além de produzir maior engajamento de usuários da bacia contemplados pelo programa produtor de água na conservação do solo e dos recursos hídricos.

3.3 Valoração de PSA

Conforme a valoração dos valores locais de PAErosão (Tabela 3), os cenários Pastagem e Floresta podem ser beneficiados com o PSA de R\$ 75,00/ha e R\$ 50/ha, respectivamente. O cenário Pastagem evidencia-se por requerer menor valor de PSA por percentual de abatimento da erosão em relação ao cenário Floresta.

Os benefícios hidrológicos estimados pelos índices PACN e PAEscoamento também podem ser economicamente valorados. No entanto, é importante um enquadramento mais detalhado dos valores de PSA, contribuindo para a valorização das ações de conservação dos usuários da bacia hidrográfica, que podem ser contemplados de acordo com benefícios ambientais gerados.

A compensação justa dos provedores de serviços ambientais deve utilizar uma combinação adequada de incentivos financeiros e regulamentos, tendo como referência o monitoramento da qualidade da água dos cursos d'água adjacentes (Postel & Thompson, 2005). Além disso, é importante a determinação do ponto ótimo da relação entre os custos dos projetos de conservação e seus efeitos na retenção do solo e da água (Bühlmann *et al.*, 2010)

4 CONCLUSÕES

Tendo em vista a minimização da perda de solo e água, a recuperação das pastagens degradadas existentes mostra-se vantajosa em relação ao cenário de adensamento de florestas esparsas. Nas condições estudadas, o direcionamento de incentivos econômicos aos produtores rurais da atividade pecuária tem maior eficiência na conservação do solo e água.

Considerando-se a relativa facilidade de estimativa do parâmetro CN em relação aos fatores C e P do modelo USLE, a utilização do parâmetro CN apresenta maior viabilidade de aplicação em bacias hidrográficas no território brasileiro;

Os benefícios hidrológicos estimados pela variação dos valores de escoamento superficial e do parâmetro CN também podem ser economicamente valorados.

É importante a análise da relevância do projeto de conservação no contexto da bacia hidrográfica. O que deve conduzir a uma maior participação de usuários da bacia, contemplados pelo programa produtor de água, na contribuição da conservação do solo e dos recursos hídricos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas, 2008. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. Superintendência de Usos Múltiplos, Brasília. In: <<http://www.ana.gov.br/Produagua>>. Out. 2009.
- BÜHLMANN, E.; WOLFGRAMM, B.; MASELLI, D.; HURNI, H.; SANGINOV, S.R.; LINIGER, H.P. Geographic information system–based decision support for soil conservation planning in Tajikistan. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.65, p.151-159, 2010.
- BRASIL – Ministério das Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF.21 Campo Grande: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Levantamento de Recursos Naturais, 28 , 412 p., 1982.
- CHAVES, H.M.L.; BRAGA JR. B.; DOMINGUES. A.F.; SANTOS, D.G. Quantificação dos benefícios ambientais e compensações financeiras do“Programa do Produtor de Água” (ANA): I.Teoria. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.9, n.3, p.5-14 2004.
- EBRAHIMIAN, M.; SEE, L.F.; ISMAIL, M. H.; MALEK, I. A. Application of Natural Resources Conservation Service – Curve Number Method for Runoff Estimation with GIS in the Kardeh Watershed, Iran. **European Journal of Scientific Research**, v.34, n.4, p.575-590, 2009.
- ELHAKEEM, M.; PAPANICOLAOU, A.N. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. **Water Resources Management**, v.23, n.12, p.2455-2473, 2009.
- ENGEL, S.; PAGIOLA, S.; WUNDER, S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an overview of the issues. **Ecological Economics**, n.65, n.4, p.663-674, 2008.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc., 2006. **ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.2**. ESRI, Redlands, U.S.
- FSA - Food Security Act of 1985. **United States, Public Law 99 – 198, Title XII: Conservation**. 99 Stat. 1504, 23 December 1985.
- GABELLANI, S.; SILVESTRO, F.; RUDARI, R.; BONI, G. General calibration methodology for a combined Horton-SCS infiltration scheme in flash flood modeling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.8, p.1317-1327, 2008.
- GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. Distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, n.5, p.1015-1023, 1998.
- HUANG, M., JACQUES, G., WANG, Z., MONIQUE, G.A Modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological processes**, v.20, n.3, p.579-589, 2006.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. **LANDSAT 5 TM imagery, channels 1,2 ,3 ,4, 5, 6, 7, orbit 225, position 74 on 18 December 2008**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. In: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. 17 March 2009.
- JOSE, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. **Agroforestry Systems**. 76, 1-10.

- KINNELL, P.I.A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. **Journal of Hydrology**, v.385, n.1-4, p.384-397, 2010.
- KOSOY, N.; MARTINEZ-TUMA, M.; MURADIAN, R.; MARTINEZ-ALIER, J. Payments for environmental services in watersheds: Insights from a comparative study of three cases in Central America. **Ecological Economics**, v.61, n.2-3, p.446-455, 2007.
- LELE, S. Watershed services of tropical forests: from hydrology to economic valuation to integrated analysis. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.1, p.148-155, 2009.
- MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. **Hydrological Processes**, v.18, n.17, p. 3323-3345, 2004.
- MISHRA, S.K.; TYAGI, J.V.; SINGH, V.P.; SINGH, R. SCS-CN based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v.324, n.1-4, p.301-322. 2006.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. **National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology**, 210-VI-NEH-630.10 US Department of Agriculture, Washington DC, pp. 7-1 - 7-5. 2004.
- PATTANAYAK, S.K. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.104, p.171-184, 2004.
- PIMENTEL D.; HARVEY C.; RESOSUDARMO P.; SINCLARE K.; KURZ D.; MCNAIR M.; CRIST S.; SHPRITZ L.; FITTON L.; SAFFOURI R.; BLAIR R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v.267, n.5201, p.1117-1123, 1995.
- POSTEL, S.L.; THOMPSON, B.H. Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services. **Natural Resources Forum**, v.29, n.2, p.98-108, 2005.
- RIBEIRO, S.C.; CHAVES, H.M.L.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L. Estimativa do abatimento de erosão aportado por um sistema agrossilvipastoril e sua contribuição econômica. **Revista Árvore**, v.31, p.285-293, 2007.
- RICKETTS, T.H.; DAILY, G.C.; EHRLICH, P.R.; MICHENER, C.D. Economic value of tropical forest to coffee production. **Proceedings of the National Academy of Sciences. USA**. 101, 12579-12582, 2004
- SCS - Soil Conservation Service, 1956. **National Engineering Handbook, Section 4, Chapter 10**. US Department of Agriculture, Washington DC.
- SCS - Soil Conservation Service, 1993. **Storm Rainfall Depth, National Engineering Handbook, Section 4, Chapter 4**. US Department of Agriculture, Washington DC.
- SEIDL, A.F.; SILVA, J.S.V.; MORAES, A.S. Cattle ranching and deforestation in the Brazilian Pantanal. **Ecological Economics**. v.36, n.3, p.413-425, 2001.
- SHARDA, V.; DOGRA, P.; PRAKASH, C. Assessment of production losses due to water erosion in rainfed areas of India. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.65, n.2, p.79-91, 2010.
- SHI, Z.H.; CHEN, L.D.; FANG, N.F.; QUIN, D.F.; CAI, C.F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v.77, n.1, p.1-7, 2009.

- SHRESTHA, R.K.; ALAVALAPATI, J.R.R. Valuing environmental benefits of silvopasture practice: a case study of the Lake Okeechobee watershed in Florida. **Ecological Economics**, v.49, n.3, p.349-359, 2004.
- SOULIS, K.X.; VALIANTZAS, J.D.; DERCAS, N.; LONDRA, P.A. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.605-615, 2009.
- TEFERA, B.; STERK, G. Land management, erosion problems and soil and water conservation in Fincha'a watershed, western Ethiopia. **Land Use Policy**, v.27, n.4, p.1027-1037, 2010
- TIBURCIO, E. C. **ArcGIS interface for support to watershed-modeling work: extensão do software ArcGIS 9.2** In:< <http://arcscrips.esri.com/details.asp?dbid=15070>>. October 2009. 2005.
- TYAGI, J.V.; MISHRA, S.K.; SINGH, R.; SINGH, V.P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v.352, n.3-4, p.388-403, 2008.
- USDA - United States Department of Agriculture, 1986. **Urban hydrology for small watersheds**. Soil Conservation Service, Engineering Division. Technical Release 55 Version 2.31. In: <<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/hydro/hydro-tools-models-tr55.html>>. October 2009.
- USDA – United States Department of Agriculture. Agricultural Statistics. **Government Printing Office**, Washington DC, 2008.
- WANTZEN, K.M. Cerrado streams – characteristics of a threatened freshwater ecosystem type on the Tertiary Shields of Central South America. **Amazoniana**, v.17, n.3-4, p.481-502, 2003.
- WANTZEN, K.M.; SANTOS, S.A.; DA CUNHA, C.N.; JUNK, W.J.; GIRARD, P.; ROSSETTO, O.C.; PENHA, J.M.; COUTO, E.G.; BECKER, M.; PRIANTE, G.; TOMAS, W.M.; SANTOS, S.A.; MARTA, J.; DOMINGOS, I.; SONODA, F.; CURVO, M.; CALLIL, C. Towards a sustainable management concept for ecosystem services of the Pantanal wetland. **Ecohydrol. Hydrobiol**, v.8, n.2-4, p.115-138, 2008.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses**. A guide to conservation planning. Washington: USDA Agriculture Handbook, n. 537, 58p. 1978.
- YANG, W.; BRYAN, B.A.; MACDONALD, D.H.; WARD, G.; WELLS, N.D.; CROSSMAN, E.J.D.; CONNOR, W. A conservation industry for sustaining natural capital and ecosystem services in agricultural landscapes. **Ecological Economics**. v.69, n.4, p.680-689, 2010.
- YU, B. Theoretical Justification of SCS Method for Runoff Estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.124, n.6, p.306-310, 1998.
- ZABEL, A.; ROE, B. Optimal design of pro-conservation incentives. **Ecological Economics**, v.69, p.126-134, 2009.

CAPÍTULO 3

Simulador de chuvas portátil aplicado a estimativa do parâmetro CN do método runoff Curve Number (CN)

Resumo: Estimativas de escoamento superficial baseadas em tabelas padrões do método runoff Curve Number (CN) podem induzir resultados não acurados em razão da falta de calibração local do parâmetro CN. Deste modo, analisou-se a aplicabilidade de um simulador de chuvas portátil para estimativas in-situ do parâmetro CN. Para tanto, tomou-se por base três classes de solo sob cobertura de pastagem cultivada (*Brachiaria sp.*) e quatro metodologias para obtenção do valor de CN. Verifica-se que a metodologia que fornece estimativas locais da razão de abstração inicial, mostra-se adequada em relação às demais metodologias cujas razões de abstração inicial foram preestabelecidas. Portanto, o simulador de chuvas utilizado possibilita a calibração dos valores de CN e a formação de tabelas específicas que relacionam classes de solo, uso e cobertura do solo, sendo capaz de trazer avanços na simulação viável e acurada tanto do método CN quanto dos modelos hidrológicos que o envolvem.

Palavras-chave: Infiltrômetro de aspersão, modelo hidrológico, chuva artificial

Abstract: Estimations of runoff based on standard tables of the runoff Curve Number (CN) method can induce to inaccurate results. Thus, we analyzed the applicability of a portable rainfall simulator for in-situ estimates of the parameter CN. For this, we studied three soil classes under cultivated pasture (*Brachiaria sp.*) and four methods. The results showed that the methodology, which provides local estimates of initial abstraction ratio, is adequate compared with other methodologies studied. Therefore, the rainfall simulator used allows the calibration of parameter CN, the formation of specific tables and the improvement of the simulations with hydrological models which use this parameter.

Keywords: Sprinkler infiltometer, hydrological model, artificial rain

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência dos processos erosivos está diretamente relacionada aos fenômenos de escoamento superficial. Diversos modelos hidrológicos foram propostos para estimativa do escoamento superficial a partir de séries de eventos pluviométricos, sendo a utilização desses limitada em virtude da elevada quantidade de dados necessários e requisitos de calibração (Shi *et al.*, 2009). Nesse sentido, o modelo hidrológico runoff Curve Number (CN) (SCS, 1956; USDA, 1986) é mundialmente utilizado, pois estima, de forma simplificada, o escoamento superficial decorrente de eventos individuais de precipitação, considerando características físicas do terreno e condições climáticas (Ponce & Hawkins, 1996; Soulis *et al.*, 2009). Vários modelos de erosão hídrica e qualidade da água empregam este método, tais como: CREAMS (Knisel, 1980), SWRRB (Williams *et al.*, 1985) AGNPS (Young *et al.*, 1989), EPIC (Sharpley & Williams, 1990), PERFECT (Littleboy *et al.* 1992), SWAT (Arnold *et al.*, 1996), SCS-CN-based modeling of sediment yield (Mishra *et al.*, 2006a) e SCS-CN based time-distributed sediment yield model (Tyagi *et al.*, 2008).

O parâmetro CN, principal componente do método CN, define o potencial de produção de escoamento superficial mediante um valor numérico na escala de 1 a 100. Originalmente, a atribuição dos valores de CN é realizada por meio de tabelas que relacionam o grupo hidrológico do solo, uso e cobertura do solo, além da umidade antecedente a precipitação em análise. No entanto, de acordo com diversos pesquisadores (Elhakeem & Papanicolaou, 2009; King & Balogh, 2008; Kim *et al.*, 2010) o uso dos valores tabelados de CN, em regiões com condições diferentes das quais estes foram obtidos, pode resultar em estimativas não acuradas do escoamento superficial.

Apesar da ampla utilização do método CN, não existe um procedimento padrão para estimativa do parâmetro CN a partir de dados de chuva e vazão. Na maioria dos estudos, o valor de CN é obtido na forma composta, utilizando-se séries de dados de chuva e vazão de bacias hidrográficas. Grove *et al.* (1998) constataram que a aplicação do parâmetro CN na forma distribuída produz melhores resultados que na forma composta.

O valor de CN está relacionado com a capacidade de infiltração média da bacia hidrográfica (Yu, 1998; Mishra *et al.*, 2004). Assim, a obtenção de CN para locais específicos pode ser realizada por meio de simuladores de chuva (Elhakeem & Papanicolaou, 2009). Simuladores de chuva portáteis, aplicados em parcelas com área de, aproximadamente, 1 m², são notáveis por favorecer sua mobilização e aplicação viável. Estes equipamentos permitem a obtenção de dados hidrológicos para diferentes combinações de classes de solo, cobertura e

sistemas de cultivo (Alves Sobrinho *et al.*, 2008). Além disso, a utilização de chuvas artificiais elimina a necessidade de espera por um determinado evento de chuva natural.

Deste modo, analisou-se a aplicabilidade de um simulador de chuvas portátil por meio de quatro metodologias para estimativas *in situ* de parâmetro CN, em diferentes classes de solo sob cobertura de pastagem cultivada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em diferentes classes de solo presentes na bacia hidrográfica do ribeirão Salobra, localizada entre as coordenadas 20° 12' S a 20° 28' S e 54° 55' W a 55° 16' W (Figura 1). A área de estudo é de considerável relevância ecológica, pois situa-se nos limites dos biomas Pantanal e Cerrado. Sua ocupação é eminentemente rural, predominando-se a atividade pecuária extensiva. As classes de solo presentes são: Latossolo Roxo distrófico (LR), Latossolo Vermelho escuro álico (LV) e Neossolo Quartzarênico álico (NQ) (Brasil, 1982). Em cada uma dessas classes de solo, ocupadas por pastagem cultivada (*Brachiaria* sp.), foram realizadas aplicações do simulador de chuvas portátil e estimativas de parâmetros do método CN

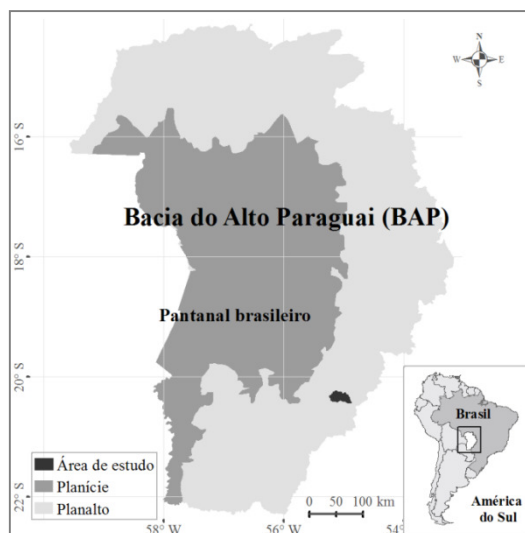


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2 Aplicação do simulador de chuvas

Os dados de infiltração e escoamento superficial foram obtidos experimentalmente com o simulador de chuvas portátil desenvolvido por Alves Sobrinho *et al.* (2008). O

equipamento é constituído de cinco módulos independentes, tendo transporte e operação facilitada em campo (Figura 2). O InfiAsper é equipado com dois bicos Veejet 80.150, posicionados a 2,30 m de altura em relação ao solo, que produzem chuva artificial com diâmetro médio volumétrico de gotas correspondente a 2,0 mm. A relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo simulador e a energia cinética da chuva natural corresponde a valores acima de 90%.

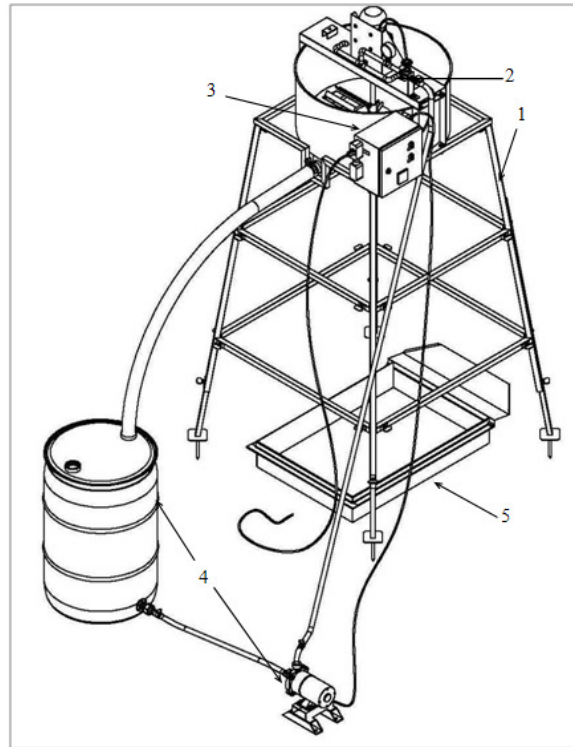


Figura 2. Simulador de Chuvas (InfiAsper). Legenda: estrutura (1); unidade de aplicação de água (2); sistema elétrico (3); bomba d'água (4); e coletor de escoamento (5)

A área da parcela experimental é de $0,70 \text{ m}^2$, esta foi delimitada por chapas de aço galvanizado, no formato retangular, com $0,70 \text{ m}$ de largura e 1 m de comprimento no sentido do declive, permitindo a coleta do volume de água escoado superficialmente.

As parcelas experimentais receberam um pré-molhamento de cerca de 250 mm , 12 h antes da aplicação da chuva simulada buscando-se oferecer condições uniformes de umidade na parcela experimental e garantir condições próximas à saturação do solo no período de realização do experimento. Para isso, utilizou-se de uma malha de 20 gotejadores, com vazão unitária de $0,002 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, dispostos uniformemente sobre as parcelas. Os locais das parcelas experimentais apresentaram as características descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições iniciais da parcela: caracterização edáfica e de cobertura do solo

Classe de solo										
LR				LV			NQ			
Horizontes (cm)										
A (0-20)	AB (20-39)	BA (39-57)	Bw (57-109)	A (0-25)	AB (25-46)	Bw (64-109)	A (0-20)	AB (20-46)	BA (46-82)	Bw (82-130)
Matéria orgânica (%)										
0,33	0,19	0,05	0,05	0,58	1,17	0,70	0,23	0,16	0,28	0,93
Classe textural										
Franco-argilosa	Argilosa			Areia-franca	Franco-arenosa		Areia-franca	Franco-arenosa		
Umidade inicial										
38,0±2,0%				12,3±0,4%			27,3±3,1%			
Cobertura de pastagem (massa seca, g.m ⁻²)										
530,2±31,7				775,5±71,1			1132,4±158,9			
Declividade (%)										
9,9				10,5			6,9			

O simulador de chuvas foi calibrado para aplicação de chuva contínua, com intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹. O intervalo de tempo compreendido entre o início da aplicação da chuva e o início do escoamento foi registrado como tempo de início do escoamento superficial em cada parcela. Após o início do escoamento superficial, foram realizadas coletas sucessivas do escoamento superficial durante o período de um minuto, com intervalos de 1 minuto, totalizando 30 coletas por parcela, no período de uma hora de teste.

2.3 Modelo Horton

Os experimentos com chuva simulada fornecem valores de taxa de infiltração, obtidos pela relação entre lâmina de água infiltrada e o tempo de infiltração considerado. Os dados experimentais de infiltração foram, então, ajustados ao modelo de Horton (Horton, 1940) (eq. 1), conforme recomendações de Panachuki *et al.* (2006).

$$F_t = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

em que: F_t = volume total de infiltração após o tempo t ; f_t = taxa de infiltração no tempo t ; t = tempo transcorrido desde o início do processo de infiltração; f_0 = taxa de infiltração inicial (tempo $t = 0$); f_c = taxa de infiltração final, alcançada em condições próximas a saturação; k = taxa de decaimento constante da taxa de infiltração.

A diferença entre a quantidade precipitada e a infiltração total permitiu a obtenção de valores de escoamento superficial total.

2.4 Método runoff Curve Number (CN)

O método CN é um modelo semi-empírico utilizado para estimar o escoamento superficial decorrente de eventos individuais de precipitação, considerando o balanço hídrico exposto na eq. 2 e hipótese de que a razão entre a atual e potencial de retenção é igual à razão entre o atual e potencial escoamento superficial (eq. 3) (USDA, 1986; Yu, 1998). Os principais parâmetros para predição do escoamento superficial pelo método CN são o potencial máximo de retenção (S) e a abstração inicial (Ia) (eqs. 4 a 6) (Elhakeem & Papanicolaou, 2009; USDA, 1986).

$$P = Ia + F + Q \quad (2)$$

$$\frac{Q}{P-Ia} = \frac{F}{S} \quad (3)$$

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia)+S} \text{ se } P > Ia, \text{ caso contrário } Q=0 \quad (4)$$

$$Ia = \lambda S \quad (5)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

em que: P = precipitação total (mm); Ia = abstração inicial (mm); F = infiltração acumulada; Q = escoamento acumulado (mm); S = potencial máximo de retenção no solo (mm); λ = razão de abstração inicial (adimensional); e CN = número da curva de escoamento (adimensional).

O parâmetro S é observado após o início do escoamento superficial. De acordo com Misha & Singh (2004), o grau de contribuição da bacia hidrográfica para a geração do escoamento superficial direto depende, sobretudo, do parâmetro S. Por outro lado, o parâmetro Ia é definido como parte da precipitação que sofre interceptação na cobertura vegetal, infiltração no solo e acúmulo em depressões do terreno, sendo o total precipitado entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial (Shi *et al.*, 2009), considera-se sua correlação linear com o parâmetro S (Gabellani *et al.*, 2008). O método CN, na sua forma original, estabelece a razão de abstração (λ) igual a 0,2.

O parâmetro CN define, mediante um valor numérico, o potencial de produção de escoamento superficial. A atribuição dos valores de CN é proveniente de tabelas (USDA, 1986) que relacionam características físicas da bacia hidrográfica, tais como: grupo hidrológico do solo, uso e cobertura do solo, além da condição de umidade antecedente (Soulis *et al.*, 2009).

Considerando precipitações acima de 23 mm, o escoamento superficial, estimado pelo método CN, é mais sensível a variação dos valores do parâmetro CN do que em relação a quantidade precipitada (Hawkins, 1975). Diversos estudos revelam que o parâmetro CN não apresenta correlação significativa com a declividade (Pandit & Heck, 2009; Huang *et al.*, 2006; Ebrahimian *et al.*, 2009). Semelhantemente, Elhakeem & Papanicolaou (2009) não identificaram relevante influência da intensidade de precipitação nos valores de CN. Deste modo, o presente estudo não considerou a influência dos fatores declividade e intensidade de precipitação.

2.5 Estimativas do parâmetro CN

Primeiramente, o parâmetro CN foi determinado por meio da tabela original (USDA, 1986), inferindo-se a classificação do grupo hidrológico do solo e a condição de cobertura de pastagem, com base nas descrições estabelecidas. Em seguida, consideraram-se quatro metodologias envolvendo dados advindos dos experimentos com simulador de chuvas portátil para a determinação do parâmetro CN.

2.5.1 Metodologias $CN_{0,2}$ e $CN_{0,05}$

O método CN pressupõe $\lambda = Ia/S$ igual a 0,2 (USDA, 1986), no entanto, diversos pesquisadores sugerem λ igual a 0,05 (Hawkins *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2006; White *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2009). Deste modo, foram aplicados ambos os valores de λ propostos, 0,2 e 0,05 (eqs. 7 e 8), para obtenção dos valores de CN (eq. 6).

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (7)$$

$$Q = \frac{(P-0,05S)^2}{P+0,95S} \quad (8)$$

2.5.2 Metodologia CN_{fc}

Os valores experimentais de taxa de infiltração final, obtidos em parcelas com cobertura de pastagem (fc) para cada classe de solo estudada, foram utilizados na estimativa do parâmetro S, conforme a eq. 10, proposta por Hawkins (1979), que considera $Ia/S = 0,2$. Em seguida, o parâmetro S foi convertido em CN (eq. 9).

$$S = P \sqrt{\frac{fc}{I_p}} / (1 - 0,8 \sqrt{\frac{fc}{I_p}}) \quad (9)$$

em que: S = capacidade máxima de armazenamento no solo (mm); P = precipitação total (mm); fc = taxa de infiltração final na parcela com cobertura (mm.h⁻¹); I_p = intensidade de precipitação (mm.h⁻¹).

2.5.3 Metodologia CN_{Ia/s}

Pruski *et al.* (1997) propõem o cálculo de Ia a partir do tempo para início do escoamento superficial durante a aplicação da chuva simulada (eq. 10). Então, as estimativas de Ia foram utilizadas para determinação do parâmetro CN (eqs 4 e 6).

$$t_e = \frac{Ia \cdot 60}{I_p} \quad (10)$$

em que: t_e = intervalo de tempo correspondente ao período entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial (min); Ia = abstração inicial; I_p = intensidade máxima de precipitação.

2.5.4 Conversão dos valores de CN

O valor de CN foi estimado em condições máximas de umidade antecedente (Antecedent Moisture Conditions - AMC III) (SCS, 1993), em razão da realização do pré-molhamento das parcelas experimentais. Então, de forma a efetuar-se a comparação entre os valores de CN estimados e os tabelados, foi realizada a conversão dos valores de CN, referentes às condições úmidas (AMCIII), para valores de CN referentes às condições médias de umidade (AMCII), por meio da eq. 11 proposta por Mishra *et al.* (2008).

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,43 + 0,0057 \cdot CN_{II}} \quad (11)$$

em que: CN_{III} = valor de CN referentes às condições úmidas (AMCIII); CN_{II} = valor de CN referentes às condições médias de umidade (AMCII).

2.5.5 Análise de dados

O conjunto de quatro metodologias de estimativa do parâmetro CN foi aplicado em três classes de solo, ocupadas por pastagem cultivada. Cada metodologia foi considerada como um tratamento. Foram amostradas três parcelas experimentais para cada classe de solo,

totalizando-se nove experimentos com chuva simulada. Em seguida, os valores estimados de CN foram comparados aos inferidos a partir da tabela convencional (Figura 3). A análise estatística dos dados de CN obtidos pelas metodologias descritas seguiu o delineamento de blocos casualizados, comparando-se as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

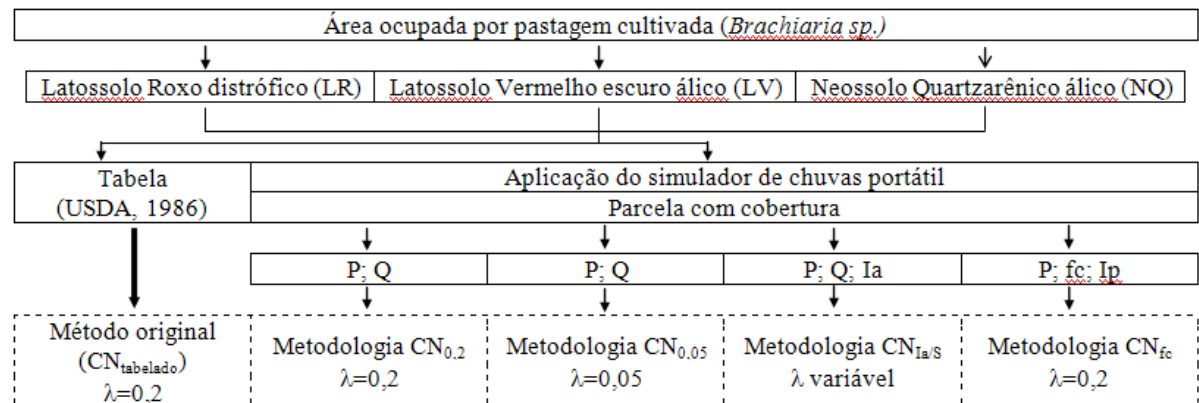


Figura 3. Procedimentos por tratamento

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas advindas da simulação de chuvas nas classes de solo amostradas forneceram parâmetros referentes à: taxa de infiltração final (fc) do modelo de Horton; períodos de tempo para início do escoamento (te); e coeficientes de escoamento (razão entre a quantidade total escoada e precipitada, C_{runoff}) (Tabela 2).

Tabla 2. Valores médios obtidos dos experimentos com simulador de chuvas

Classes de solo	t_e (min)	fc (mm.h ⁻¹)	C_{runoff} (%)
Latossolo Roxo distrófico (LR)	5,33±0,44a	16,68±0,84	70±1
Latossolo Vermelho escuro álico (LV)	5,67±0,89a	41,06±0,98a	28±2a
Neossolo Quartzarênico álico (NQ)	13,00±2,00	42,81±0,85a	26±1a

Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey

Verificou-se que os valores do coeficiente C_{runoff} apresentaram correlação linear significativa entre as estimativas *in situ* do parâmetro CN e referentes às parcelas experimentais amostradas (Figura 4).

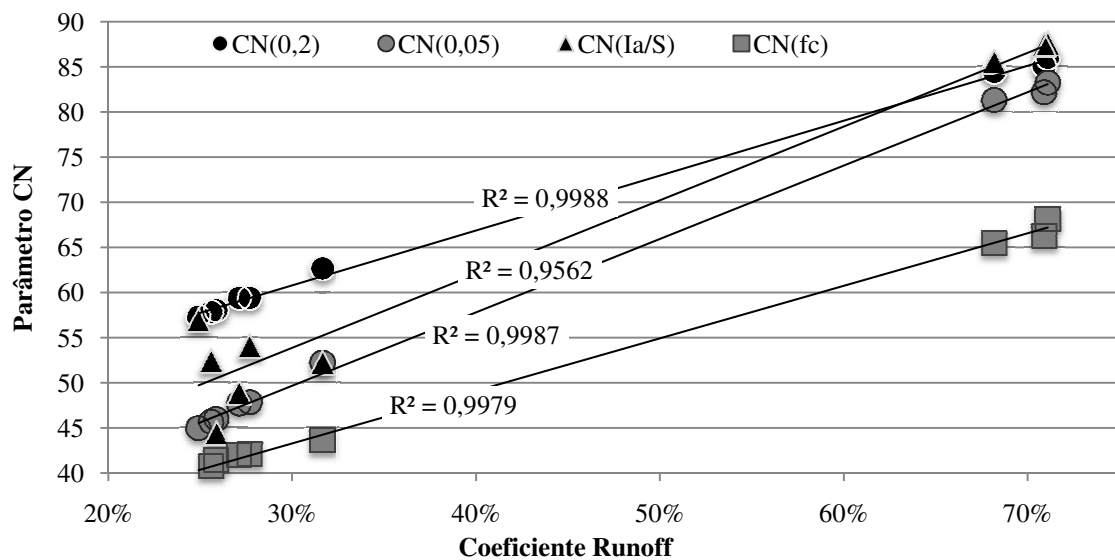


Figura 4. Correlação linear entre o C_{runoff} e os valores de CN

As metodologias de estimativa *in situ* dos valores de CN foram comparadas entre si e com os valores provenientes da tabela padrão-USDA (Figura 5).

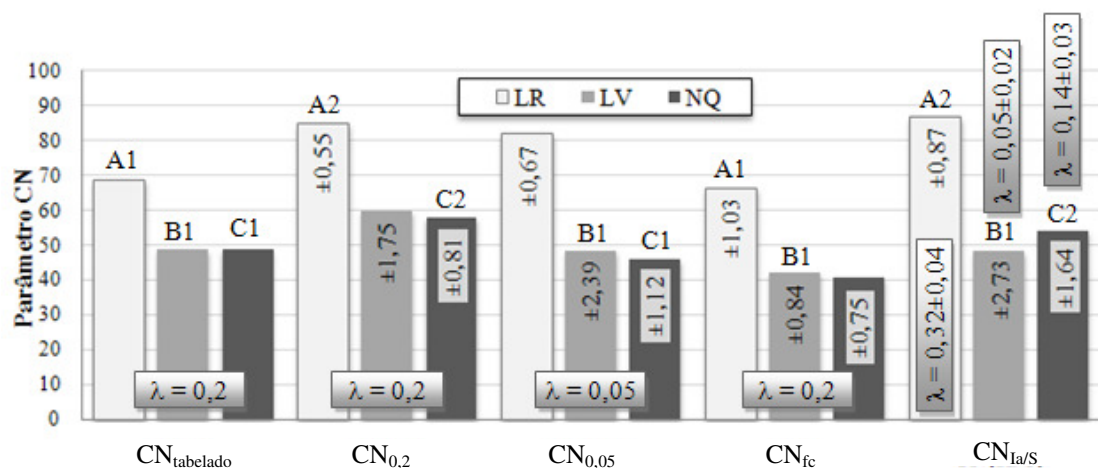


Figura 5. Valores médios do parâmetro CN resultantes de cada metodologia estudada. Legenda: médias com letras iguais não diferem entre si a 5% pelo teste de Tukey; os valores indicados no interior das barras correspondem ao desvio padrão

Os valores de CN tabelados, cuja razão de abstração (λ) estabelecida é 0,2, foram menores que os estimados pela metodologia $CN_{0,2}$. Estudos revelam que os valores de CN tabelados subestimam o escoamento para grandes eventos de chuva e superestimam para pequenos eventos (Yoo *et al.*, 1993; Shi *et al.*, 2009), o que foi confirmado, em função da elevada precipitação aplicada (aproximadamente 60 mm). Verifica-se que para as classes de solo LV e NQ, o valor de CN tabelado assemelha-se as estimativas de CN resultantes das metodologias com λ igual a 0,05.

A metodologia $CN_{Ia/S}$, que fornece estimativas locais de λ , apresentou valores significativamente iguais aos de outras metodologias que consideraram semelhantes razões de abstração, para as três classes de solo. Constata-se que as estimativas locais de λ foram próximas aos valores encontrados por outros autores, citados por Hawkins *et al.* (2010) (Tabela 3). Portanto, a metodologia $CN_{Ia/S}$ fornece valores satisfatórios de λ e CN.

Tabela 3. Valores da razão de abstração (λ) propostos por diversos autores.

Baltas <i>et al.</i> (2007)	Elhakeem & Papanicolaou (2009)	Shi <i>et al.</i> (2009)	Woodward <i>et al.</i> (2003)	Lim <i>et al.</i> (2006)	Chandramohan & Mathew (2005)	White <i>et al.</i> (2009)
Estimativas de $\lambda = I_a/S$ para eventos				Aplicação de valores de $\lambda = I_a/S$ em modelos hidrológicos		
Estimativas do valor de λ				Valor de λ com melhor desempenho		
0.014	0.037	0.142	0.069	0.04	0.05	0.05
Grécia baixo sudoeste	Grécia alto sudoeste	Eventos de verão	Eventos de outono			

Fonte: adaptado de Hawkins *et al.* (2010)

Os valores de CN advindos da metodologia CN_{fc} , que considera a taxa de infiltração final, não apresentam relação com a razão de abstração de outras metodologias.

Constata-se que o simulador de chuvas portátil utilizado possibilita a obtenção do parâmetro CN pela metodologia desenvolvida por Pruski *et al.* (1997), denominada $CN_{(Ia/S)}$. O equipamento pode ser aplicado para calibração dos valores de CN e geração de tabelas específicas que relacionam classes de solo, uso e cobertura do solo. O que permite a simulação mais acurada tanto do método CN quanto dos modelos hidrológicos que o envolvem.

4 CONCLUSÕES

Os valores de CN tabelados apresentam inferiores aos estimados pela metodologia que utiliza dados de chuva simulada e igual razão de abstração.

A metodologia desenvolvida por Pruski *et al.* (1997), que fornece estimativas locais da razão de abstração, mostra-se adequada em relação as demais metodologia cuja razão de abstração foi pré-estabelecida.

O simulador de chuvas utilizado possibilita a geração de tabelas específicas que relacionam classes de solo, uso e cobertura do solo, além de permitir a simulação mais acurada tanto do método CN quanto dos modelos hidrológicos que o envolvem.

O simulador de chuvas é adequado para estimativas *in situ* do parâmetro CN em bacias rurais. Podendo ser estudado, também, em áreas urbanas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J.A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v.24, n.2, p.163-170, 2008.

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; SRINIVASAN, R.; KING, K.W. **SWAT: Soil and Water Assessment Tool**. USDA-ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX. 1996.

BALTAS, E.A., DERVOS, N.A., MIMIKOU, M.A. Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1825-1829, 2007.

BRASIL – Ministério das Minas e Energia. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SF.21 Campo Grande: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Levantamento de Recursos Naturais, 28 , 412 p., 1982.

CHANDRAMOHAN, T.; S. Mathew, S. Field estimation of runoff curve number estimated from rainfall-runoff data. **Hydrology Journal**, v.28, n.1-2, p.71-78, 2005.

EBRAHIMIAN, M.; SEE, L.F.; ISMAIL, M. H.; MALEK, I. A. Application of Natural Resources Conservation Service – Curve Number Method for Runoff Estimation with GIS in the Kardeh Watershed, Iran. **European Journal of Scientific Research**. v.34, n.4, p.575-590, 2009.

ELHAKEEM, M.; PAPANICOLAOU, A.N. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. **Water Resources Management**, v.23, n.12, p.2455-2473, 2009.

GABELLANI, S.; SILVESTRO, F.; RUDARI, R.; BONI, G. General calibration methodology for a combined Horton-SCS infiltration scheme in flash flood modeling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.8, p.1317-1327, 2008.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. Distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths. **Journal of the American Water Resources Association**, v.34, n.5, p.1015-1023, 1998.

HAWKINS, R.H. Inferring curve numbers from simulator data. In **Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop**, p.45-59, 1979.

HAWKINS, R.H. The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff. **Journal of the American Water Resources Association**, v.11, n.5, p.887-890, 1975.

HAWKINS, R.H.; HJELMFELT JR, A.T.; ZEVENBERGEN, A.W. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.111, n.4, p.330-339, 1985.

HAWKINS, R.H.; WARD, T.J.; WOODWARD, D.E.; VAN MULLEM, G.J.A. Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. In: **Proceedings 4th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference**, p.1-12, 2010.

- HAWKINS, R.H.; WOODWARD, D.E.; JIANG, R. **Investigation of the runoff curve number abstraction ratio**. Paper presented at USDA-NRCS Hydraulic Engineering Workshop, Tucson, Arizona. 2002.
- HORTON, R.E. An approach towards physical interpretation of infiltration capacity. **Proceedings of the Soil Science Society of America**, v.5, p.399-417, 1940.
- HUANG, M., JACQUES, G., WANG, Z., MONIQUE, G.A. Modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. **Hydrological processes**, v.20, n.3, p.579-589, 2006.
- KIM, N.W.; LEE, J.W.; LEE, J.; LEE, J.E. SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. **Hydrological Processes**, 2010. doi: 10.1002/hyp.7638.
- KING, K. W.; BALOGH, J.C. Curve numbers for golf course watersheds. **Transactions of the ASABE**, v.51, n.3, p.987-996, 2008.
- KNISEL, W.G. **CREAMS: a field-scale model for chemical, runoff and erosion from agricultural management systems**. Conservation Research Report, v.26. South East Area, US Department of Agriculture, Washington, DC. 1980.
- LIM, K.J.; ENGEL, B.A.; MUTHUKRISHNAN, S.; HARBOR, J. Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology. **Journal of the American Water Resources Association**, v.42, n.3, p.629-643, 2006.
- LITTLEBOY, M.; SILBURN, D.M.; FREEBAIRN, D.M.; WOODRUFF, D.R.; HAMMER, G.L.; LESLIE, I.K. Impact of soil erosion on production in cropping land systems. I. Development and validation of a simulation model. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p.757-774, 1992.
- MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates. **Hydrological Processes**, v.18, n.17, p. 3323-3345, 2004.
- MISHRA, S.K.; JAIN, M.K.; BABU, P.S.; VENUGOPAL, K.; KALIAPPAN, S. Comparison of AMC-dependent CN-conversion Formulae, **Water Resources Management**, v.22, n.10, p.1409-1420, 2008.
- MISHRA, S.K.; TYAGI, J.V.; SINGH, V.P.; SINGH, R. SCS-CN based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v.324, n.1-4, p.301-322. 2006.
- NRCS - Natural Resources Conservation Service. **National Engineering Handbook**. Part 630 Hydrology, 210-VI-NEH-630.10 US Department of Agriculture: Washington DC, p. 1-9, 2004.
- PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M.A. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Acta Scientiarum**, v.28, n.1, p.129-137, 2006.
- PANDIT, A.; HECK, H.H. Estimations of Soil Conservation Service Curve Numbers for Concrete and Asphalt. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.14, n.4, p.335-345, 2008.
- PONCE, V.M.; HAWKINS, R.H. Runoff curve number: has it reached maturity?. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.1, n.1, p.11-19, 1996.
- PRUSKI, F.F.; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; CECON, P.R. A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.123, n.1, p.8-12, 1997.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; GRIEBELER, N.P. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.403-410, 2001.

SCS, Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington DC, 1956.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. **EPIC—Erosion/Productivity Impact Calculator: 1.Model Documentation**. US Department of Agriculture Technical Bulletin, v.1768. US Government Printing Office, Washington, DC. 1990.

SHI, Z.H.; CHEN, L.D.; FANG, N.F.; QUIN, D.F.; CAI, C.F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v.77, n.1, p.1-7, 2009.

SOULIS, K.X.; VALIANTZAS, J.D.; DERCAS, N.; LONDRA, P.A. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.605-615, 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, n.3-4, p.388-403, 2008.

USDA. **Urban hydrology for small watersheds**. Technical release, no 55 (TR-55). Soil Conservation Service, Washington, DC, 1986.

WHITE, E.D.; FEYEREISEN, G.W.; VEITH, T.L; BOSCH, D.D. Improved Daily Water Yield Estimates in the Little River Watershed: SWAT Adjustments. **Transaction of the ASABE**, v.52, n.1, p.69-79, 2009.

WILLIAMS J.R., NICKS A.D., ARNOLD J.G. Simulator for Water Resources in Rural Basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.111, n.6, p.970-986, 1985.

WOODWARD, D.E.; HAWKINS, R.H.; JIANG, J.; HJELMFELT, JR., A.T.; VAN MULLEM, J.A.; QUAN, Q.D. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. In: **Proceedings World Water and Environmental Resources Congress**, p. 1-10, 2003. doi:10.1061/40685(2003)308.

YOO, K.H.; K.S. YOON.; J.M. Soileau. Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillages. **Transactions of the ASABE**, v.36, p.57-63, 1993.

YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSCH, D.D.; ANDERSON, W.P. AGNPS: a nonpoint-source model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.44, n.2, p.168-173, 1989.

YU, B. Theoretical Justification of SCS Method for Runoff Estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.124, n.6, p.306-310, 1998.

CONCLUSÕES GERAIS

A priorização de áreas classificadas como altamente erodíveis para aplicação do PSA, direciona os recursos financeiros para manutenção de regiões com maior risco natural a erosão. A aplicação deste procedimento na bacia de estudo contemplou uma área inferior a metade da área passível de ser beneficiada pelo programa brasileiro de serviços ambientais. A união de áreas naturalmente propensas a erosão com as restrições advindas da classificação de aptidão agrícola, reduz drasticamente as alternativas de uso do solo, direcionando-as, em grande parte, para a atividade pecuária, com pastagens plantadas ou naturais.

A análise de modelos de quantificação de serviços ambientais propiciados por projetos de conservação indicam que a utilização do parâmetro CN apresenta maior viabilidade de aplicação em bacias hidrográficas, em virtude da relativa facilidade de estimativa do parâmetro CN em relação aos fatores C e P do modelo USLE, atualmente utilizados no programa brasileiro de serviços ambientais.

O simulador de chuvas utilizado é adequado para estimativas *in situ* do parâmetro CN em bacias rurais, possibilitando a geração de tabelas específicas que relacionam classes de solo, uso e cobertura do solo. O que permite, também, a simulação mais acurada tanto do método CN quanto dos modelos hidrológicos que o envolvem.