

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Análise Multicritério dos Serviços Hidro-ambientais do Programa Produtor de
Água/ANA: um Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão Pípiripau (DF/GO)**

LUÍSA VIEIRA BOGÉA SOARES

Orientador: Henrique Marinho Leite Chaves

**Trabalho de Conclusão de Curso a ser
apresentado ao Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de Brasília como parte
das exigências para aprovação da Graduação em
Engenharia Florestal**

**Brasília
Dezembro de 2015**

**Análise Multicritério dos Serviços Hidro-ambientais do Programa Produtor de
Água/ANA: um Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão Pípiripau (DF/GO)**

Brasília, dezembro, 2015.

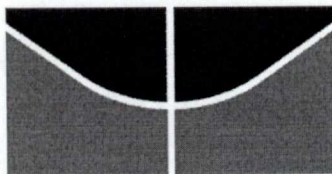
Assinatura do Professor Orientador

Henrique Marinho Leite Chaves

Assinatura do Aluno

Luísa Vieira Bogéa Soares

Matrícula: 09/12638



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO DOS SERVIÇOS HIDRO-AMBIENTAIS DO
PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA/ANA: UM ESTUDO DE CASO NA
BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU (DF/GO)**

Estudante: Luisa Vieira Bogéa Soares

Matrícula: 09/12638

Menção: MS

Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves
Departamento de Engenharia Florestal
Universidade de Brasília – UnB
Orientador

Prof. Dr. Alcides Gatto
Universidade de Brasília
Membro da Banca

Prof. Dr. Eraldo A. T. Matricardi
Departamento de Engenharia Florestal
Universidade de Brasília – UnB
Orientador

Dezembro/2015

RESUMO

A provisão de serviços hidro-ambientais requer bacias hidrográficas saudáveis. A sustentabilidade de bacias hidrográficas depende, por sua vez, da manutenção de taxas seguras de erosão e sedimentação dentro e fora das propriedades rurais. Entretanto, iniciativas de pagamentos por serviços ambientais, como o Programa Produtor de Água/ANA se baseiam em um único critério, como a porcentagem de abatimento de erosão, resultante de práticas conservacionistas adotadas pelos participantes. Apesar de o Programa pressupor uma redução proporcional da sedimentação, ele não inclui um método de avaliação direta deste processo. Como a promoção da sustentabilidade da bacia hidrográfica requer a regulação da erosão e da sedimentação dentro e fora da propriedade, este estudo teve como objetivo avaliar, ao mesmo tempo, três critérios de eficiência hidro-ambientais : a) percentual de abatimento da erosão de, no mínimo, 25% ($P.A.E. \geq 25\%$); b) redução da erosão dentro da propriedade ($A \leq 1/5 T$); c) redução da sedimentação fora da propriedade ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Esses três critérios foram aplicados a 70 projetos individuais de propriedade, inscritas no Programa Produtor de Água na bacia do ribeirão Pipiripau. No estudo, 100% das propriedades atenderam ao critério (a), 80% ao critério (b) e 100% ao critério (c). Ou seja, os 70 projetos do Programa Produtor de Água/ANA apresentam alta eficiência hidro-ambiental no que diz respeito à redução da erosão e sedimentação, dentro e fora da propriedade. Como o enfoque utilizado utiliza uma análise mais holística do processo sedimentológico na bacia, ele poderá ser adotado em programas de PSA no futuro.

Palavras-chave: erosão, sedimentação, efeitos ‘on’ e ‘off-site’, Programa Produtor de Água, Pagamento por Serviços Ambientais.

ABSTRACT

Multicriteria Analysis of Watershed Services from the ‘Programa Produtor de Água/ANA: a Case Study on the Pípiripau Watershed (DF/GO)

The provision of watershed services requires healthy watersheds. Their sustainability, on the other hand, depends on the maintenance of safe rates of erosion and sedimentation on and off-site. Nevertheless, most payments for environmental services, such as the ‘Programa Produtor de Água/ANA’ are based on one single criterion, in which case is the percentage of erosion reduction result of conservationist practices. Even though the Program assumes that proportional reduction on sedimentation occurs, it doesn’t include a direct method for measuring it. As the sustainability of the watershed requires the control of both erosion and sedimentation on and off-site, this study aimed to evaluate, at the same time, three criteria: a) the percentage of erosion reduction to, at least, 25% ($P.E.R \geq 25\%$); b) the reduction of the on-site erosion ($A \leq 1/5 T$) and c) the reduction of sedimentation off-site ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). These three criteria were applied to 70 rural properties located on the Pípiripau watershed and registered on the ‘Programa Produtor de Água’. It was found that 100% of the properties met the criterion (a), 80% the criterion (b) and 100% the criterion (c). These results point that all the 70 properties registered in the ‘Programa Produtor de Água’ presented high environmental efficiency concerning erosion and sedimentation reduction, on and off-site. Because the analysis proposed in this study is a much more holistic approach of the sedimentological process occurring on the watershed, it can be adopted in future payments for environmental services.

Key-words: erosion, sedimentation, on and off-site effects, Programa Produtor de Água, Payment for Environmental Services.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1	OS SERVIÇOS HIDROAMBIENTAIS NO ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	2
2.2	A EROSIÃO DO SOLO E SEU IMPACTO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	4
2.2.1	A necessidade de critérios ‘on’ e ‘off-site’ para limitar a erosão.....	8
2.2.2	Critério de redução da erosão ‘on-site’	8
2.2.3	Critério de redução da erosão ‘off-site’	11
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DA EROSIÃO: EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO – USLE	12
2.4	A BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU E SUA PROBLEMÁTICA.....	12
2.5	PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS	16
2.6	O PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA E SUA APLICAÇÃO NA BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU	17
3	METODOLOGIA	17
3.1	PROPRIEDADES ANALISADAS NA BACIA.....	17
3.2	USOS DO SOLO ANTES E DEPOIS DA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA	19
3.3	AÇÕES CONSERVACIONISTAS DO PROGRAMA	19
3.4	CRITÉRIOS DE EFETIVIDADE DOS SERVIÇOS HIDRO-AMBIENTAIS DAS AÇÕES DO PROGRAMA.....	20
3.4.1	Critério da Porcentagem de Abatimento da Erosão (P.A.E).....	20
3.4.2	Critério redução da erosão on-site ($A \leq 1/5 T$).....	21
3.4.3	Critério redução da erosão off-site ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	22
3.5	APLICAÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO ÀS PROPRIEDADES DA BACIA 23	
4	RESULTADOS	23
4.1	RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DOS CRITÉRIOS	23
4.2	VALORES DE PERDAS DE SOLO, APORTE DE SEDIMENTOS E PERCENTUAL DE ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS ‘ON’ E ‘OFF-SITE’	26
5	DISCUSSÃO	Error! Bookmark not defined.
6	CONCLUSÃO	28
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades e respectivas áreas analisadas no presente estudo	18
Tabela 2. Modalidades de ações do Projeto Produtor de Água contempladas no presente estudo	19
Tabela 3. Valores de Tolerância à erosão para os tipos de solo encontrados na área de estudo dentro da bacia do ribeirão Pípiripau	21
Tabela 4. Critérios da análise com os seus respectivos serviços ambientais.....	23
Tabela 5. Valores médios calculados para as variáveis relativas aos três critérios da análise.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos serviços hidroambientais, adaptado de Millenium	3
Figura 2. Ilustração dos tipos de erosão hídrica - de impacto das gotas de chuva ("splash"), laminar ("sheet"), em sulcos ("rill") e em voçorocas ("gully")	6
Figura 3. Erosão laminar e em sulcos	6
Figura 4. Voçoroca.....	7
Figura 5. Erosão em túnel	7
Figura 6. Localização da bacia do ribeirão Pípiripau	13
Figura 7. Localização dos núcleos rurais e urbanos na área da bacia do ribeirão Pípiripau ...	14
Figura 8. Cidade de Arapoanga, localizada dentro da área da bacia do ribeirão Pípiripau. O entulho de lixo e as casas de estruturas precárias são indícios do crescimento urbano acelerado	15
Figura 9. Localização das 70 propriedades estudadas na bacia do ribeirão Pípiripau	18
Figura 10. Número de propriedades que atenderam ao critério 3 P.A.E no núcleo rural Taquara e no núcleo rural Pípiripau.	24
Figura 11. Quantidade de propriedades que atenderam ao critério on-site ($A \leq 1/5 T$).....	25
Figura 12. Quantidade de propriedades que atenderam ao critério on-site: $A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no núcleo rural Taquara e no núcleo rural Pípiripau.	26

Figura 13. Percentual final de propriedades a atender aos critérios avaliados depois da implantação das práticas conservacionistas.27

1 INTRODUÇÃO

O processo de ocupação humana nas bacias hidrográficas causa a erosão do solo, que é talvez a maior problemática ambiental afetando diretamente o homem na atualidade (Jain; Kothiyari, 2000). Assim, as análises econômicas dos serviços ambientais gerados por bacias hidrográficas concentram-se principalmente em torno dos efeitos da redução da erosão (Pattanayak, 2004), sendo também esta o alvo para os novos sistemas de pagamentos por serviços ambientais.

O Pagamento por Serviços Ambientais - PSA constitui um incentivo financeiro a atores que proporcionem o fornecimento de serviços ambientais para a sociedade através de práticas conservacionistas. Ele já é uma tendência mundial, com estimativas de 287 programas de pagamento por serviços florestais (Landell-Mills, 2002; citado por Godecke, 2014) e 216 programas de pagamento por serviços hidroambientais (Stanton et al., 2010) no mundo. No Brasil, o PSA é a base de funcionamento para o Programa Produtor de Água (PPA-ANA), de adesão voluntária de pequenos produtores rurais, que visa reduzir a erosão e assoreamento de mananciais rurais para melhorar a qualidade e quantidade de água dos rios.

Programas voltados para a garantia da sustentabilidade hidro-ambiental de bacias hidrográficas, como o Produtor de Água/ANA devem promover melhorias dentro e fora das propriedades (Postel e Thompson, 2005). Essas melhorias vão desde o fornecimento de água de boa qualidade e em quantidades adequadas para o consumo humano, animal e para irrigação, até a preservação de ecossistemas e dos seus valores imateriais, como o lazer e a educação (ANA, 2012).

O PSA tem se mostrado eficiente na redução do aporte de sedimentos em diversas bacias hidrográficas no mundo (Stanton et al., 2010) e no Brasil (Lima et al., 2013). Porém, o PSA aplicado ao Programa Produtor de Água/ANA enfrenta algumas limitações. Em primeiro lugar, apesar de considerar indiretamente os benefícios gerados ‘off-site’ (fora da propriedade), o único critério avaliado para o pagamento é o de redução da erosão ‘on-site’ (dentro da propriedade), o que é insuficiente para garantir a sustentabilidade da bacia (Rodrigues et al., 2011).

Além disso, existem incertezas associadas à estimativa da erosão dentro da propriedade, em função das variabilidades espaciais e temporais associadas ao valor médio de perda de solo, que devem ser incorporadas a fim de garantir limites sustentáveis de erosão

(Chaves, 2010). Visando atender, ao mesmo tempo, às melhorias hidroambientais dentro e fora da propriedade, deve-se empregar, nos Programas de PSA, como o Produtor de Água, uma análise mais abrangente de seus impactos, incorporando critérios de erosão e sedimentação, dentro e fora da propriedade.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a efetividade dos benefícios hidro-ambientais proporcionados por práticas conservacionistas implantadas em propriedades selecionadas na bacia do ribeirão Pípiripau, no âmbito do Programa Produtor de Água, usando três critérios distintos de abatimento de erosão e de sedimentação, dentro e fora da propriedade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 OS SERVIÇOS HIDRO-AMBIENTAIS NO ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Bacias hidrográficas saudáveis promovem serviços ambientais valiosos à sociedade (Postel e Thompson., 2005), tais como a produção de alimentos, de água, de energia etc. No entanto, manter estes benefícios já é um desafio para a quase totalidade de bacias hidrográficas no mundo, visto que o crescimento da população e o desenvolvimento econômico dessas áreas implica na modificação dos ecossistemas com consequências importantes, como a queda da quantidade e qualidade da água, gerando aumento do seu preço de abastecimento para consumo humano e queda de produtividade agrícola e rendimento hidrelétrico (Postel; Thompson, 2005; Brauman et al., 2007).

A Millennium Ecosystem Assessment (2003) sugere a divisão dos serviços ambientais em 4 categorias (Figura 1):

- a) Serviços de Provisão
- b) Serviços de regulação
- c) Serviços culturais
- d) Serviços de suporte

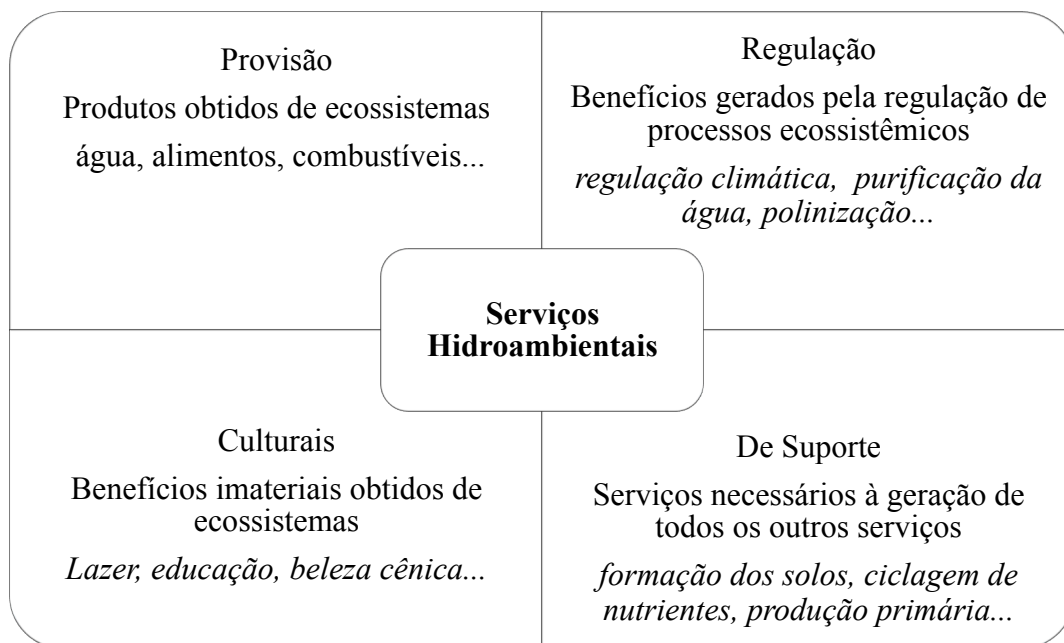


Figura 1. Classificação dos serviços hidroambientais. Fonte: adaptado de Millenium Ecosystem Assessment (2003).

As bacias hidrográficas são provedoras de serviços pertencentes a todas as quatro classificações citadas. Abaixo, são apresentados os quatro principais atributos hidrológicos garantidos em bacias hidrográficas saudáveis e responsáveis pela promoção dos serviços hidrológicos (Brauman et al., 2007):

- a) **Quantidade** - Quantidade de água disponível para consumo ou irrigação ou ainda a quantidade de água de inundação.
- b) **Qualidade** - Medida dos químicos, patógenos, sais, nutrientes e sedimentos na água de superfície ou subterrânea.
- c) **Localização** - Local onde a água se encontra: no subsolo, a jusante ou a montante do rio, dentro ou fora de um canal. Neste caso, o serviço ocorre quando o usuário pode ter acesso à água ou quando ela não causa prejuízos, como no caso de inundações.
- d) **Timing** - É o momento no qual a água está disponível. A queda do nível dos rios durante a seca ou os picos de vazões durante a estação chuvosa devem ser controlados a fim de garantir aos usuários a quantidade de água necessária para o desenvolvimento de suas atividades.

Os serviços hidroambientais são especialmente importantes em regiões de clima tropical, tanto pela sazonalidade climática que define períodos de chuva e estiagem quanto pelo fato de que as populações são altamente dependentes da atividade agrária, que por sua vez depende do bom funcionamento dos processos hidrológicos e edáficos (Lele, 2009). A bacia do ribeirão do Pipiripau é um bom exemplo deste caso, já que está inserida no bioma Cerrado, marcado por duas estações, chuvosa e seca (Chaves; Piau, 2008), e apresenta cerca de 70% de sua área ocupada pela agricultura (Brasil, 2010).

Pattanayak (2004) indica a necessidade de expandir os estudos sobre benefícios econômicos gerados por bacias hidrográficas, a fim de aumentar o nível de investimentos públicos na sua proteção. Nesse sentido, os investimentos tendem a aumentar proporcionalmente à expansão do conhecimento sobre os benefícios que as bacias aportam à sociedade. As análises econômicas dos serviços ambientais gerados por bacias hidrográficas concentram-se principalmente em torno dos efeitos da redução da erosão (Pattanayak, 2004), provavelmente devido à urgência de se combater esta que é talvez a maior problemática ambiental afetando diretamente o homem na atualidade (Jain; Kothiyari, 2000).

2.2 A EROSÃO DO SOLO E SEU IMPACTO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

O solo é um recurso não renovável, provedor diversos serviços vitais ao homem e aos ecossistemas (Skidmore, 1982; Bazzoffi, 2009; E.C., 2006). Mas a sua degradação permanente pode ocorrer em períodos muito curtos (Bazzoffi, 2009), gerando impactos severos ao homem e ao meio ambiente (Zhao et al., 2013; Telles et al., 2011). A erosão hídrica é uma das principais preocupações relacionadas ao manejo de solos tropicais e o escoamento superficial, o responsável pelo transporte e deposição desses sedimentos (Avanzi et al., 2008).

O processo de erosão hídrica apresenta três fases: a primeira consiste na desagregação do solo superficial pelo impacto das gotas de chuva e a segunda é o transporte das partículas desagregadas pela enxurrada e a terceira, a deposição de sedimentos nos corpos hídricos e locais de relevo em depressão (Dedecek et al., 1986). Quando a carga de sedimentos na enxurrada excede sua capacidade de transporte, ocorre a sedimentação (Dedecek et al., 1986). A taxa de erosão depende não somente das chuvas e escoamentos superficiais, mas também de atributos físicos das bacias hidrográficas, como o tipo de solo, de vegetação e as

características topográficas (Jain; Kothiyari, 2000). A erosão hídrica é classificada em diferentes tipos (Austrália, 2015) – Figuras 2.

- Erosão de impacto das gotas de chuva – é gerada pela energia cinética liberada pelo impacto das gotas de chuva no solo, causando o salpico de partículas de solo para fora de seu local de origem.
- Erosão laminar – é a remoção de finas camadas de solo pelo impacto das gotas de chuva ou por fluxos de água superficiais. Este tipo de erosão é aquela que retira as partículas de solo que carregam a maior quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas e de matéria orgânica. Normalmente, ela é de difícil percepção e acaba sendo identificada somente devido ao seu efeito cumulativo.
- Erosão em sulcos – é a perda de solo por drenagens estreitas de, no máximo, 30 cm de profundidade. Ocorre mais frequentemente em solo nu ou em solos recentemente cultivados em que já houve perda de estrutura devido a erosões recorrentes.
- Erosão em voçorocas – são canais de drenagem de mais de 30 cm de profundidade. Eles se formam quando os sulcos mais estreitos se acumulam e abrem grandes canais no solo
- Erosão em túnel – ocorre quando águas de superfície adentram solos dispersivos, que são aqueles que tem uma estrutura frágil devido à sua composição por conglomerados de sódio ou argila e tendem a dissolver-se na presença de água. Assim, a erosão em túnel envolve processos físicos e químicos e necessita um manejo diferenciado (Davies & Lacey, 2009)

A erosão laminar e em sulcos é representada na Figura 3, a erosão em voçorocas, na Figura 4 e a erosão em túnel, na Figura 5.

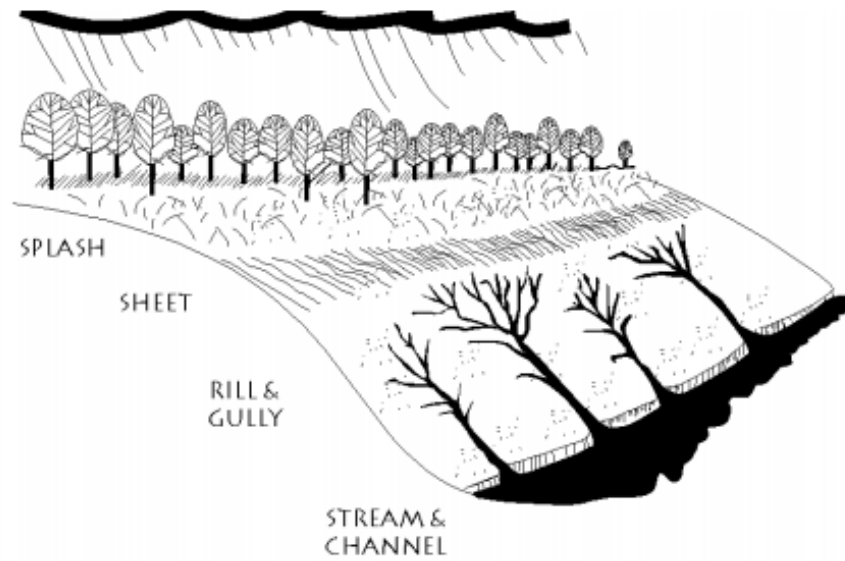


Figura 2. Ilustração dos tipos de erosão hídrica - de impacto das gotas de chuva ("splash"), laminar ("sheet"), em sulcos ("rill") e em voçorocas ("gully"). Fonte: Austrália (2015).



Figura 3. Erosão laminar e em sulcos. Fonte: Queensland (2015).



Figura 4. Voçoroca. Fonte: Queensland (2015).



Figura 5. Erosão em túnel. Fonte: Queensland (2015).

Os efeitos da erosão podem ser de dois tipos: ‘on-site’ e ‘off-site’ (FAO, 2015). Os efeitos ‘on-site’ são aqueles que afetam diretamente o local ou a propriedade cultivada por meio da perda, destruição ou redução da matéria orgânica e dos nutrientes do solo, causando a redução da profundidade do solo cultivável e da umidade disponível para as plantas (Telles et

al., 2013). O resultado são limitações ao crescimento das plantas e perda de produtividade (FAO, 2015; Telles et al., 2011).

Já os efeitos ‘off-site’ da erosão são aqueles observados fora do local ou propriedade, afetando a sociedade em geral (externalidade negativa para a sociedade) (Telles et al., 2011). O principal é a sedimentação, cujas consequências mais nefastas são o aumento do risco de inundações, eutrofização dos rios e reservatórios, redução da qualidade da água e aumento do risco de enchentes (Telles et al., 2011; Telles et al., 2013).

Pesquisas sobre a erosão em pequena escala tendem a focar-se nos efeitos ‘on-site’, enquanto os de larga escala concentram-se nos efeitos ‘off-site’ (Verheijen, 2009). No entanto, estudos em bacias hidrográficas na Itália (Bazzoffi, 2009) e nos Estados Unidos (Nearing, 2002) recomendam análises dos efeitos dentro e fora da propriedade, como estratégia mais adequada e eficiente na identificação de áreas prioritárias de conservação.

2.2.1 A necessidade de critérios ‘on’ e ‘off-site’ para limitar a erosão

A definição de valores limitantes da erosão é essencial para a avaliação correta de dados obtidos de monitoramentos (Verheijen, 2009). Assim, ‘on-site’ (dentro da propriedade) é o local onde a erosão ocorre, e ‘off-site’ (fora da propriedade) é o destino permanente ou temporário do sedimento erodido (Verheijen, 2009).

2.2.2 Critério de redução da erosão ‘on-site’

A tolerância do solo à erosão é o valor máximo de erosão aceitável em uma determinada área (Wischmeier, 1976). Verheijen (2009) explica que esse conceito surgiu logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, na Europa, quando os plantios agrícolas estavam destruídos ou altamente comprometidos.

Segundo Nearing (comunicação pessoal), os valores de Tolerância à erosão utilizados atualmente nos Estados Unidos tem origem em uma “Conferência Coletiva sobre Práticas em Encostas” (“Joint Conference on Slope-Practice”), realizada em 1956, na

Universidade de Purdue, e organizada pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), com o fim de estabelecer valores máximos de erosão no país.

Os valores de tolerância à erosão (T) definidos na conferência de 1956 foram importantes para sanar as necessidades de informação daquela época em termos de degradação de terras agrícolas, usadas para a produção de alimentos. Naquele enfoque, quanto maior a profundidade efetiva do solo, maior é sua tolerância à erosão, sendo esta definida em função da manutenção da produtividade agrícola do solo.

A primeira ideia de tolerância à erosão era a do limite máximo de perda de solo para que não haja queda de produtividade a longo prazo (Verheijen, 2009). Este conceito é altamente difundido até hoje (Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Mannigel, 2002, Li et al., 2009). Um segundo conceito mais atual estabelece que ocorre tolerância à erosão quando a taxa de formação de solo supera a taxa de perda (Nearing, 2002; Verheijen et al, 2009).

A determinação do valor de tolerância se baseia na profundidade do solo favorável ao desenvolvimento radicular e na relação textural dos horizontes superficiais (Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Mannigel, 2002). Assim, solos mais profundos, sem muita diferença textural e com boa drenagem, como aqueles com horizonte B latossólico, possuem maiores tolerâncias de perda de solo (Mannigel, 2002). Verheijen et al. (2009), em estudo sobre a erosão e Tolerância à erosão na Europa, citam que alguns países estabelecem limites diferentes de tolerância em função do risco apresentado pela região. Por exemplo, a Suíça utiliza uma tolerância de $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, porém o valor é elevado a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para alguns tipos de solo. No entanto, este autor sugere que seja sempre eleito o princípio da precaução na hora de definir um limite, de forma que, em caso de dúvida, o preferencial seria escolher o valor de $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os autores que defendem que a tolerância deve garantir a sustentabilidade ambiental do solo, isto é, que a sua taxa de formação deve estar sempre acima da taxa de perda, costumam definir um limite máximo de $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Bazzoffi (2009) reporta que qualquer taxa de erosão acima de $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ causa danos irreversíveis à qualidade do solo em período de tempo entre 50 e 100 anos. Montgomery (2007) relata que as taxas geológicas globais de erosão de topografias de declive moderado estão entre $0,001$ e $1,0 \text{ mm ano}^{-1}$. Morgan (2005), alega que as taxas médias globais de formação de solo variam de $0,01$ a $7,7 \text{ mm/ano}$. Uma taxa de formação de $0,1 \text{ mm ano}^{-1}$ é equivalente a $1,0 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, assumindo uma densidade do solo de $1,0 \text{ mg m}^{-3}$. Como $1,0 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ equivale a $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, esta

última seria o máximo de erosão aceitável para não haver degradação do solo. Este mesmo autor recomenda a utilização de tolerâncias menores que $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para evitar problemas aparentes de compactação do solo.

Como a medição de taxas de formação de solo são trabalhosas e difíceis por se tratarem de processos extremamente lentos, uma solução seria buscar igualar a Tolerância a taxas de erosão de áreas consideradas prístinas (Morgan, 2005). Chaves (2012) reporta uma erosão média de $0,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ dos solos da bacia no Pípiripau antes do início da sua antropização, em 1953.

É comum a utilização do critério $[A < T]$ como medida de conservação do solo (Wischmeyer, 1976,; Mullan, 2013). No entanto, este critério é insuficiente e leva a decisões conservacionistas equivocadas, uma vez que ele não considera as incertezas associadas à Equação Universal de Perda do Solo - USLE (Wischmeier, 1976; Chaves, 2010).

Chaves (2010) reconheceu que tanto a tolerância à erosão quanto a perda de solo da USLE são variáveis aleatórias e, como tais, possuem valores esperados de dispersão em relação à média. Esse fato gera uma probabilidade de falha na comparação dos valores de T e A, ou seja, mesmo que a média de erosão calculada esteja abaixo da média da tolerância na vertente, existe um risco de que a perda de solo ultrapasse a tolerância em determinados pontos da gleba, com a subsequente degradação do solo.

Este mesmo autor definiu a máxima probabilidade de falha $P (A < T)$ aceitável de 10%, pois o tempo de retorno de estruturas conservacionistas é geralmente de 10 anos ($P_f = 1/Tr = 10\%$). No entanto, estudando uma gleba do Distrito Federal, Chaves (2010) encontrou uma $P_f = 42,6\%$ ($A < T$), apesar de observar que a média da perda de solo estava abaixo da média da Tolerância ($9,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $12,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente).

Seguindo a metodologia de Chaves (2010), para se atingir uma P_f de 10% em glebas da bacia do ribeirão Pípiripau, as médias de A e T devem obedecer a proporção de 1:5, ou seja, a erosão média na vertente deve ser 5 vezes menor que a tolerância média, para que valores seguros de erosão ocorram em toda a extensão da gleba.

2.2.3 Critério de redução da erosão ‘off-site’

A avaliação dos impactos da erosão fora do seu local de ocorrência já é entendido como fator essencial para a sustentabilidade de bacias hidrográficas (Nearing, 2002; Morgan, 2005; Bazzoffi, 2009). Mullan (2013) utilizou limites de erosão ‘on-site’ e ‘off-site’ para avaliar a gravidade das taxas de erosão na Irlanda no presente e no futuro, este último sob o efeito das mudanças climáticas. Nearing (2002) e Bazzoffi (2009), por sua vez, sugerem a integração dos efeitos ‘off-site’ no próprio conceito de tolerância à erosão.

Os valores de limite para erosão ‘off-site’ mais encontrados na literatura são de 1,0 t/ha. ano. O USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) usa 1,0 t/ha. ano para o controle da poluição de rios por sedimentos e manutenção dos padrões de qualidade da água (Nearing, comunicação pessoal; Mullan, 2013).

Sedimentos depositados em excesso nos rios já são considerados poluentes por si só, mas eles podem ter efeito ainda mais nocivo quando trazem compostos de nitrogênio e fósforo adsorvidos, maiores responsáveis pela eutrofização (Van-Camp et al., 2004; Morgan, 2005). Morgan (2005) recomenda o estabelecimento do limite ‘off-site’ com base na poluição por fósforo bio-disponível através de sedimentos, sendo a quantidade de 1,0 t/ha⁻¹.ano⁻¹ o máximo admissível para os cursos d’água. Moldenhauer; Onstad (1975), citados por Morgan (2005) e Verheijen (2009), também sugerem o valor de 1,0 t/ha.ano como o valor máximo aceitável de poluição difusa, proveniente atividades agrícolas.

A União Européia utiliza critérios quantitativos de avaliação dos efeitos ‘off-site’, que estabelecem que as águas de superfície devem ser mantidas em “bom estado de conservação” (Verheijen, 2009 e Mullan, 2013).

Bazzoffi (2009) estabeleceu um método qualitativo para avaliar ao mesmo tempo as externalidades da erosão ‘on’ e ‘off-site’. Para isso, propôs um modelo de risco ambiental à erosão que agrega três grupos de indicadores ambientais: perigo, vulnerabilidade e nível de exposição.. Quanto maior o valor do índice, maior será o risco à erosão atribuído à localidade em questão. O autor sugere que esse índice seja associado ao valor de tolerância à perda de solo para fins de gestão, pois facilitaria a identificação de locais onde o risco de erosão é inaceitável.

Verheijen et al. (2009) também sugerem um limite de 1,0 t ha⁻¹ ano⁻¹ de sedimentação para a manutenção da qualidade da água. Estes autores não indicam a

metodologia usada para a obtenção deste valor, mas partem do fato de que, uma vez definido $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ como o máximo de erosão que garante a sustentabilidade do solo, a sustentabilidade da água também deverá ser atendida. O quadro 2 apresenta o limite off-site sugerido por este trabalho com base na literatura citada.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA EROSÃO: EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO – USLE

Modelos de erosão são interessantes pois permitem fazer projeções sobre o comportamento de localidades e condições não diretamente representadas nas pesquisas experimentais, reduzindo os custos e o tempo no processo de planejamento conservacionista (Weill & Sparovek, 2008). Além disso, modelos podem ser usados para a obtenção de conhecimentos sobre os sistemas ambientais, tanto para testar hipóteses como para o ajuste de métodos capazes de prever o manejo desses ecossistemas (Tucci, 1998).

Segundo Ouyang et al (1997), a USLE é um modelo empírico capaz de estimar a erosão laminar e em sulcos. Os modelos empíricos ou estatísticos se baseiam em dados já observados que sejam de aplicação fácil e com eficiência computacional. Já modelos determinísticos se baseiam em processos hidrológicos e sedimentológicos, gerando análises temporal e espacialmente mais precisas, porém demandando uma extensa base de dados (Ouyang et al., 1997). Assim, a USLE é um modelo simples, de fácil aplicação e com grande disponibilidade de dados (Chaves, 2010). No Brasil, apresenta grande potencial de uso, já que sua grande difusão permitiu a formação de uma base de dados ampla (Avanzi et al., 2008).

Apesar de sua praticidade, a USLE possui incertezas decorrentes da variabilidade espacial e temporal de suas variáveis preditivas (Chaves, 2010). No entanto, estas incertezas são raramente incorporadas em estudos de erosão, culminando em previsões incorretas da perda de solo e em prejuízos à sustentabilidade agrícola e ambiental de glebas (Wischmeier, 1976; Chaves, 2010).

2.4 A BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU E SUA PROBLEMÁTICA

A bacia do ribeirão Pipiripau tem uma área total de 23.527 hectares e está localizada

no nordeste do Distrito Federal, fazendo divisa com o Estado de Goiás (Chaves, 2012) (Figura 6). Com altitudes variando entre 905 e 1.225 metros, a área da bacia apresenta relevo de plano a levemente ondulado, o que caracteriza uma não tendência a inundações (CAESB, 2001). O clima é o Aw de Köppen, com precipitação anual média de 1.036 mm (Chaves, 2010). A vazão média de longo termo do ribeirão Pípiripau em sua foz é de 2,89 m³ (Chaves, 2010) Os solos mais frequentes são Latossolo Vermelho (140 km² ou 60% da área total), Latossolo Vermelho-Amarelo (35 km² ou 15%), Cambissolos (28 km² ou 12%). Estão também presentes o Neossolo Quartzarênico, o Gleissolo, e e o Nitossolo (Brasil, 2010; Chaves, 2012).

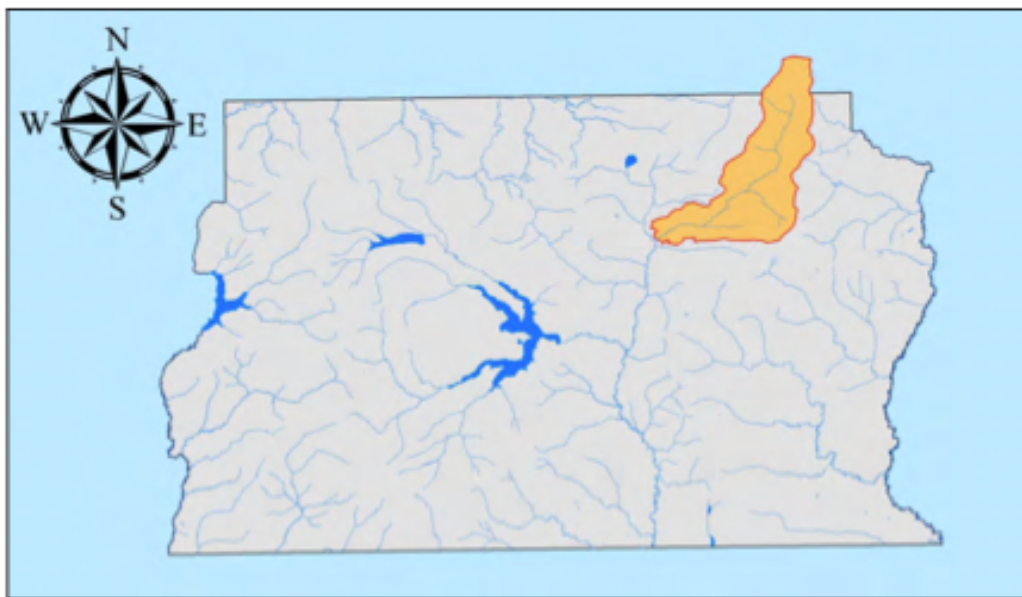


Figura 6. Localização da bacia do ribeirão Pípiripau (Brasil, 2010).

A bacia abrange os núcleos rurais Santos Dumont, Taquara e Pípiripau, parte da área rural de Planaltina e do Vale do amanhecer e, mais recentemente, a cidade de Arapoanga (CAESB, 2001; Brasil, 2010) (Figura 7).

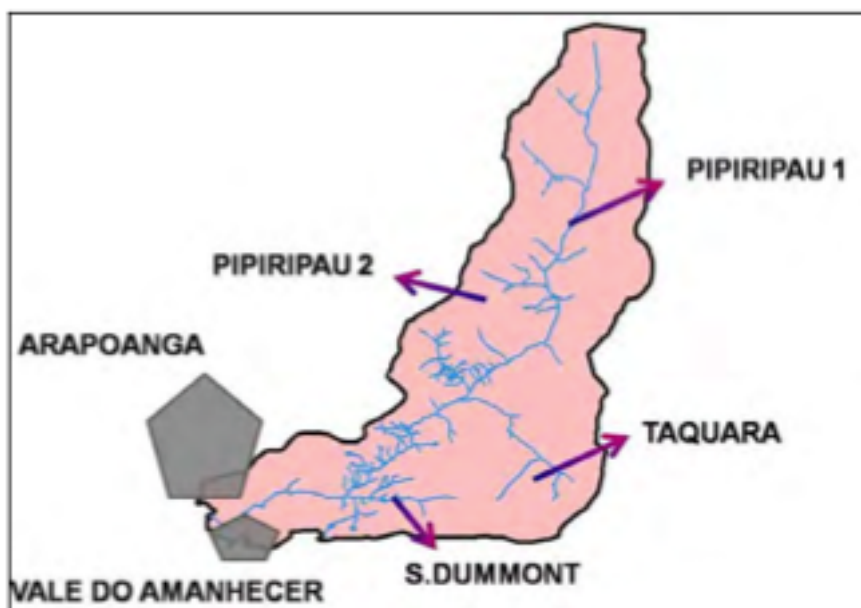


Figura 7. Localização dos núcleos rurais e urbanos na área da bacia do ribeirão Pipiripau.
Fonte: Brasil (2010)

O rápido crescimento populacional e a falta de planejamento para a ocupação da região levou a uma transformação radical da paisagem, que já é quase toda ocupada por lavouras e pastagens (13.337 hectares ou 71% da área total) (Brasil, 2010), além de zonas urbanas não planejadas. Assim, além de ser fonte de abastecimento para mais de 200.000 pessoas em Planaltina e Sobradinho (Ribeiro, 2015), a bacia também concentra diversas outras atividades de interesse, como a produção de grãos, carne e hortifrútiis (Brasil, 2010).

O resultado desse uso e ocupação é a perda de áreas extensas de Cerrado natural, inclusive aquelas de maior importância para a conservação da bacia, além de outros impactos gerados pela falta de saneamento básico, estradas, depósitos de lixo, entre outros impactos (Figura 8).



Figura 8. Cidade de Arapoanga, localizada dentro da área da bacia do ribeirão Pipiripau. O entulho de lixo e as casas de estruturas precárias são indícios do crescimento urbano acelerado. Fonte: autor (2014).

Esses fatores geraram um aumento da demanda por água, mas também a deterioração de sua qualidade, devido aos diversos impactos ambientais citados. Segundo a ADASA (2012), as captações rurais de água somam 680 litros por segundo, enquanto a captação da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) para consumo humano é de 400 litros por segundo. O conflito pelo uso da água é, portanto, recorrente, e se agrava devido a sua escassez no período de seca e erosão acelerada nos períodos de chuvas, este último contribuindo para o aumento da turbidez e, conseqüentemente, no aumento nos custos de tratamento da água (Chaves, 2012).

A erosão é a principal problemática causadora da redução da qualidade de água na bacia. Mesmo com a adoção do plantio direto, na maioria das propriedades, as práticas de manejo do solo não são adequadas, havendo, como consequência na bacia muitos pastos degradados, plantas invasoras e indícios de erosão laminar (Brasil, 2010).

Diagnósticos apresentados por Chaves (2012) para a bacia do Pipiripau apontam a perda média de solo de 8,2 t/ha.ano, e o aporte anual médio de sedimento ao exutório de 1.550 t/ano. Além disso, este mesmo autor reporta que 23,8% da sua área apresenta taxas aceleradas de erosão e 69% tem um coeficiente de escoamento superficial (CN) superior a 75.

2.5 PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é uma ferramenta de conservação de grande eficiência em diversas bacias hidrográficas no mundo (Stanton et al, 2010) e no Brasil (Lima et al., 2013). O conceito de PSA segue o princípio ‘provedor-recebedor’, onde quem contribuir para a melhoria dos serviços ambientais deve receber um benefício proporcional ao serviço prestado à bacia (ANA, 2012). Assim, em lugar de esperar ocorrer o dano e ter de repará-lo, estimula-se a conservação destes recursos com medidas compensatórias (Lima et al., 2013).

Stanton et al. (2010) listaram 216 programas de PSA em bacias hidrográficas no mundo, abrangendo 24 países. Esses autores e também calcularam que o montante de transações envolvidas nesses programas soma 9 bilhões de dólares em 2007, sendo 55% relativos a programas governamentais, 9% privados ou não-governamentais, e 36%, uma combinação de ambos.

Manajen et al. (2011), ao estudar 32 programas de PSA para bacias hidrográficas nos Estados Unidos, apontaram que a adesão de proprietários de terras ao programa ocorre não somente pelo incentivo financeiro. A noção da necessidade de conservação ambiental como condição para futuro de sua produtividade agrícola é um sentimento forte entre eles, de forma que o pagamento recebido justifica a adoção de práticas corretas que eles não poderiam arcar sem ajuda financeira e técnica.

No Brasil, o PSA está formalmente instituído na Legislação Federal (Godecke et al., 2014). Hoje, além do Projeto Conservador de Águas de Extrema, temos outros seis projetos de PSA em andamento (Godecke et al., 2014):

- Produtor de Água na bacia do ribeirão Pípiripau;
- ProdutorES de Água, em todas as bacias em todas as bacias hidrográficas do Espírito Santo, com base na lei 8.995/2008;
- Projeto Oásis, instituído em Apucarana (PR) a partir da lei 58/2009, abrangendo as bacias dos rios Ivaí, Pirapó e Tibagi;
- Produtor de Água e Floresta, na microbacia do Rio das Pedras, pertencente à bacia do rio Guandu, no município de Rio Claro (RJ);
- Produtor de Água do Balneário Camboriú (SC), na bacia hidrográfica do rio Camboriú;

- Programa Manancial Vivo, instituído pela prefeitura de Campo Grande (MS)

2.6 O PROGRAMA PRODUTOR DE ÁGUA E SUA APLICAÇÃO NA BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU

A Lei 9.433/97, prevê a realização de acordos entre usuários de água e proprietários rurais, visando à mitigação dos impactos gerados nas bacias hidrográficas (Chaves, 2004a). Nesse sentido, o Programa Produtor de Água (PPA) tem como principal objetivo reduzir a erosão e o assoreamento de mananciais no meio rural, visando melhorar a quantidade e a qualidade da água dos rios (ANA, 2010). É um programa de adesão voluntária dos produtores rurais, que tem como incentivo o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e o apoio técnico e financeiro para a adoção de práticas de conservação da água e do solo (ANA, 2010).

No Distrito Federal, o PPA é realizado desde 2008, e conta hoje com os parceiros ANA, UnB, ADASA, CAESB, EMATER-DF, IBRAM, SEAPA, Fundação Banco do Brasil, Banco do Brasil e o SESI (Brasil, 2010). Desde 2012, mais de 100 propriedades rurais já vem sendo readequadas na bacia do ribeirão Pípiripau e resultados positivos já vem sendo observados (Ribeiro, 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PROPRIEDADES ANALISADAS NA BACIA

Foram analisadas 70 propriedades localizadas nos núcleos rurais Taquara e Pípiripau, da bacia do ribeirão Pípiripau (Figura 9).

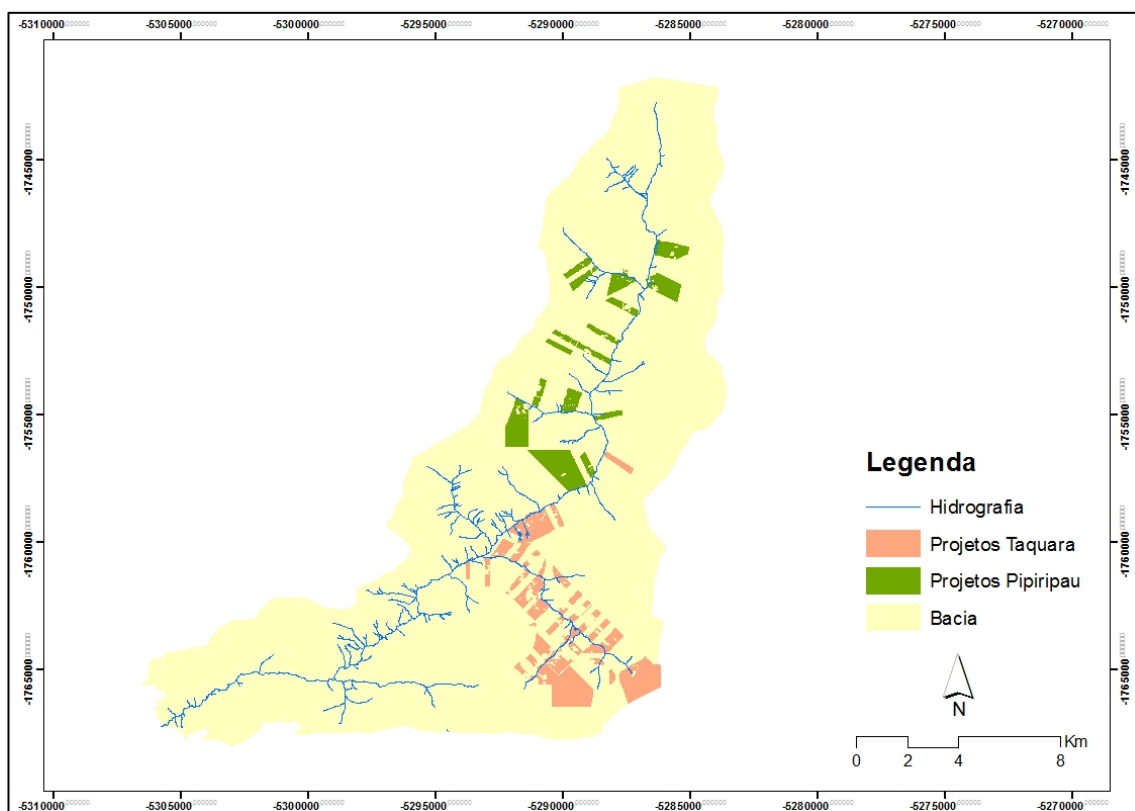


Figura 9. Localização das 70 propriedades estudadas na bacia do ribeirão Pipiripau.

Fonte: Chaves, 2015.

O primeiro contém 50 propriedades inscritas no PPA, e o segundo, 20 propriedades (Tabela 1). Projetos Individuais de Propriedade-PIPs foram elaborados pela EMATER-DF para cada uma das propriedades participantes, após um diagnóstico dos problemas e de consulta com os proprietários.

Tabela 1. Propriedades e respectivas áreas analisadas no presente estudo.

Fonte: Chaves (2015).

Núcleo Rural	Número de Propriedades	Área média dos PIPs (ha)	Área Total das Ações (ha)
Taquara	50	22,9	1.144,6
Pipiripau	20	41,6	832,1

Total	70	28,2	1.976,7
-------	----	------	---------

3.2 USOS DO SOLO ANTES E DEPOIS DA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA

Os principais usos do solo antes das medidas conservacionistas nos 70 PIPs foram lavoura extensiva, horticultura, pastagem extensiva, áreas de pousio, capoeiras, áreas degradadas de cerrado, vereda e mata de galeria, totalizando 1.976,7 ha ou 8,4% do total da bacia do ribeirão Pípiripau.

3.3 AÇÕES CONSERVACIONISTAS DO PROGRAMA

As modalidades das ações do PPA programadas nos 70 PIPs foram as seguintes (Tabela 2):

- Modalidade I: Conservação do Solo
- Modalidade II: Conservação de Área de Proteção Permanente (APP)
- Modalidade II: Conservação de Reserva Legal (RL)
- Modalidade III: Conservação de Remanescente Florestal

Tabela 2. Modalidades de ações do Projeto Produtor de Água contempladas no presente estudo. Fonte: Chaves (2015)

Núcleo Rural	Tipo de Ação	Área Total das Ações (ha)
	Conservação do solo	739,4
Taquara	Reflorestamento	405,2
	Conservação do solo	582,5
Pípiripau	Reflorestamento	249,6
Total		1.976,7

3.4 CRITÉRIOS DE EFETIVIDADE DOS SERVIÇOS HIDRO-AMBIENTAIS DAS AÇÕES DO PROGRAMA

Três diferentes critérios de efetividade das ações do Programa Produtor de Água-Pipiripau foram analisados no presente estudo: i) Percentual de Abatimento da Erosão de, no mínimo, 25% ($P.A.E \geq 25\%$) (Chaves et al., 2004 a); ii) erosão ‘on-site’ menor que um quinto do valor da tolerância à perda de solo ($A \leq 1/5 T$) (Chaves, 2010); e iii) sedimentação ‘off-site’ inferior a uma tonelada por hectare e por ano ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Morgan, 2005; Verheijen, 2009; Mullan, 2013).

3.4.1 Critério da Porcentagem de Abatimento da Erosão (P.A.E)

A premissa básica do PSA é compensar os agentes econômicos que mantêm e recuperam o meio ambiente e os recursos naturais, gerando benefícios não só a eles mesmos, mas principalmente à sociedade (ADASA, 2012). Assim, para efetivar o PSA, o Programa Produtor de Água parte do princípio que a melhoria ambiental gerada fora da propriedade pelo produtor participante é proporcional ao abatimento da erosão, através da metodologia do Percentual de Abatimento da Erosão – P.A.E (Chaves et al., 2004 a).

O P.A.E. se baseia na perda de solo antes e depois da implantação de práticas conservacionistas na gleba de interesse (Equação 1), que por sua vez é uma simplificação da Equação Universal de Perda do Solo – USLE (Chaves et al., 2004 a):

$$P.A.E (\%) = 100 (1 - A_1/A_0) \quad (1)$$

Em que:

- P.A.E (%) = o percentual de abatimento da erosão
- A_0 ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) = é a perda de solo antes a implantação das práticas conservacionistas
- A_1 ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) = a perda de solo depois das práticas conservacionistas.

Ainda de acordo com Chaves et al. (2004 a), a perda de solo A na equação 1 pode ser substituída pelo produto dos fatores C e P da USLE, uma vez que os outros fatores são os

mesmos, antes e depois da implantação das práticas. Uma exceção é o fator L, com a adoção do terraceamento em nível, havendo um cálculo específico (Chaves et al., 2004 a). Os valores de C e P, por sua vez, são tabelados para a maioria dos usos e manejos, nas situações climáticas da região Centro-Sul do Brasil.

Assim, se o valor do P.A.E após a implantação do Projeto for superior a 25%, o proprietário rural passa a receber o pagamento por serviços ambientais (ADASA, 2012 – Edital PPA).

Nesse sentido, o critério do P.A.E. > 25% é um critério operacional do Programa. Consequentemente, ele foi aplicado a cada um dos 70 PIPs analisados na bacia. Assim, se 80% dos projetos atendessem a esse critério, eles estariam em conformidade com a filosofia do Programa, e vice-versa.

3.4.2 Critério de redução da erosão on-site ($A \leq 1/5 T$)

O critério utilizado para o controle da erosão ‘on-site’ foi a comparação da perda de solo na gleba com a respectiva tolerância à erosão. Assumindo uma Probabilidade de Falha (Pf) de 10% na bacia do ribeirão Pipiripau, a erosão média deve ser cinco vezes menor que a Tolerância à erosão média a fim de garantir a sustentabilidade do solo em toda a bacia (Chaves, 2010). A Tabela 3 apresenta os valores de Tolerância à erosão utilizados neste estudo.

Tabela 3. Valores de Tolerância à erosão para os tipo de solo encontrados na área de estudo dentro da bacia do ribeirão Pipiripau. Fonte: Mannigel (2002).

Classe de Solo	Tolerância à erosão (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Latossolo Vermelho-Amarelo	11,53
Latossolo Vermelho	11,34
Cambissolo	7,95
Gleissolo	5,82

Da mesma forma, que o critério anterior, a perda de solo média (A) foi calculada pela USLE em cada propriedade, antes e depois da implantação das ações do Programa, e aquele seria atendido se, em 80% ou mais das propriedades fosse obtida uma relação de $A < 1/5T$. Se, entretanto, o oposto ocorresse, o critério não seria atendido.

3.4.3 Critério de redução da erosão off-site ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

O valor limite de $1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de aporte de sedimento, estabelecido pela literatura foi comparado ao valor do aporte de sedimento unitário, calculado para cada uma das 70 propriedades da bacia. .

O aporte de sedimento calculado (Y), por sua vez, foi obtido pelo produto entre a erosão total (A x Área) e a Relação de Aporte de Sedimento (RAS), calculadas na propriedade. A RAS é dada pela seguinte equação (Renfro, 1975): :

$$\text{R.A.S} = Y / E \quad (2)$$

Em que:

- RAS é a Relação de Aporte de Sedimento (0 a 1).
- Y é a produção de sedimento do exutório da bacia (toneladas/ano).
- E é a erosão total na bacia (toneladas/ano).

A RAS, por sua vez, está associada a uma série de complexidades por ser influenciada por diversos fatores morfológicos e ambientais (Walling, 1988; citado por Chaves, 2010 b). Assim, a sedimentação é frequentemente calculada de forma empírica, sendo a área da bacia uma das variáveis independentes mais utilizadas (Renfro, 1975; Walling, 1988; citados por Chaves, 2010 b). Neste trabalho, utilizamos a equação 3, que relaciona a RAS à distância percorrida pelo sedimento até o rio.

$$\text{R.A.S} = d^{-0,02} \quad (3)$$

Em que:

- d = distância percorrida pelo sedimento até o rio, em metros; que corresponde à distância medida do centróide da propriedade até o rio.

As glebas que receberam ações de terraceamento (Modulo I – Conservação do solo) assumiram valor de sedimentação igual a zero, já que por definição não há aporte de sedimentos em áreas com terraços em nível.

3.5 APLICAÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO ÀS PROPRIEDADES DA BACIA

A efetividade das práticas implantadas nas 70 propriedades foi avaliada pelo atendimento dos três critérios ‘on’ e ‘off-site’, definidos anteriormente. Um resumo desses critérios é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Critérios da análise com os seus respectivos serviços ambientais.

Critério	Serviço hidro-ambiental prestado
Critério P.A.E	Benefício econômico ao produtor rural
Critério on-site: $A \leq 1/5 T$	Manutenção da produtividade do solo
Critério off-site: $A \leq 1,0 t ha^{-1} ano^{-1}$	Qualidade de água na bacia

Considerando que as áreas das propriedades são semelhantes, se estabeleceu que:

- Se 80% ou mais das propriedades atendessem, ao mesmo tempo, aos três critérios acima, haveria uma *alta* eficiência hidro-ambiental do Programa, em termos de controle da erosão e da sedimentação;
- Se 80% ou mais das propriedades atendessem aos critérios ‘on-site’, haveria eficiência em relação em relação à erosão, mas não à sedimentação, e vice-versa;
- Se 80% ou mais das propriedades não atendessem a nenhum dos três critérios acima, a eficiência do Programa em termos do controle da erosão e da sedimentação seria baixa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DOS CRITÉRIOS

a) P.A.E.

O critério P.A.E foi integralmente atendido após aplicação das práticas conservacionistas (FIGURA 10), o que significa que as premissas do PPA para o PSA estão sendo satisfatoriamente cumpridas e que os produtores que aderem ao programa estão recebendo seus benefícios financeiros como previsto

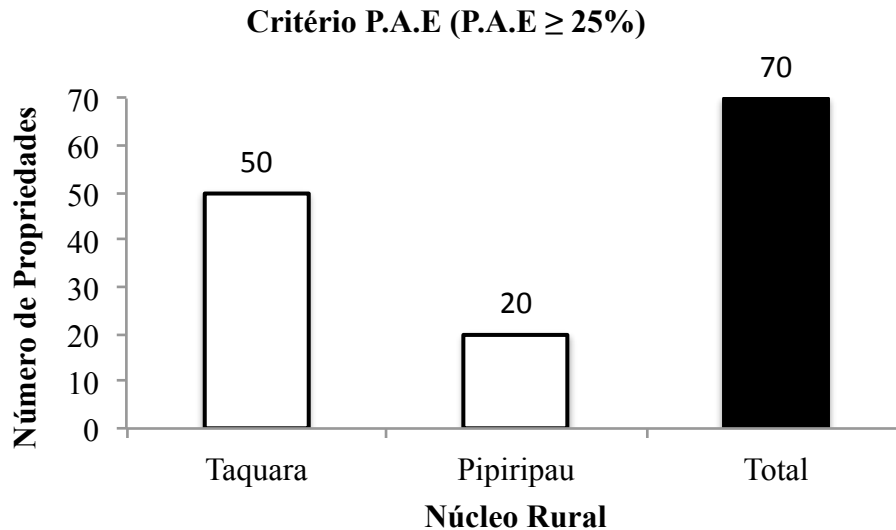


Figura 10. Número de propriedades que atenderam ao critério 3 P.A.E no núcleo rural Taquara e no núcleo rural Pipiripau.

b) Critério ‘on-site’

O segundo critério de erosão ‘on-site’ ($A \leq 1/5 T$) foi também satisfeito, com 56 (80% do total) das propriedades apresentando $A < 1/5 T$, após a aplicação das práticas conservacionistas (Figura 11). Analisando a Figura 11, observa-se que houve um aumento de 54 propriedades a atender ao critério ‘on-site’, indicando assim a importância do PPA.

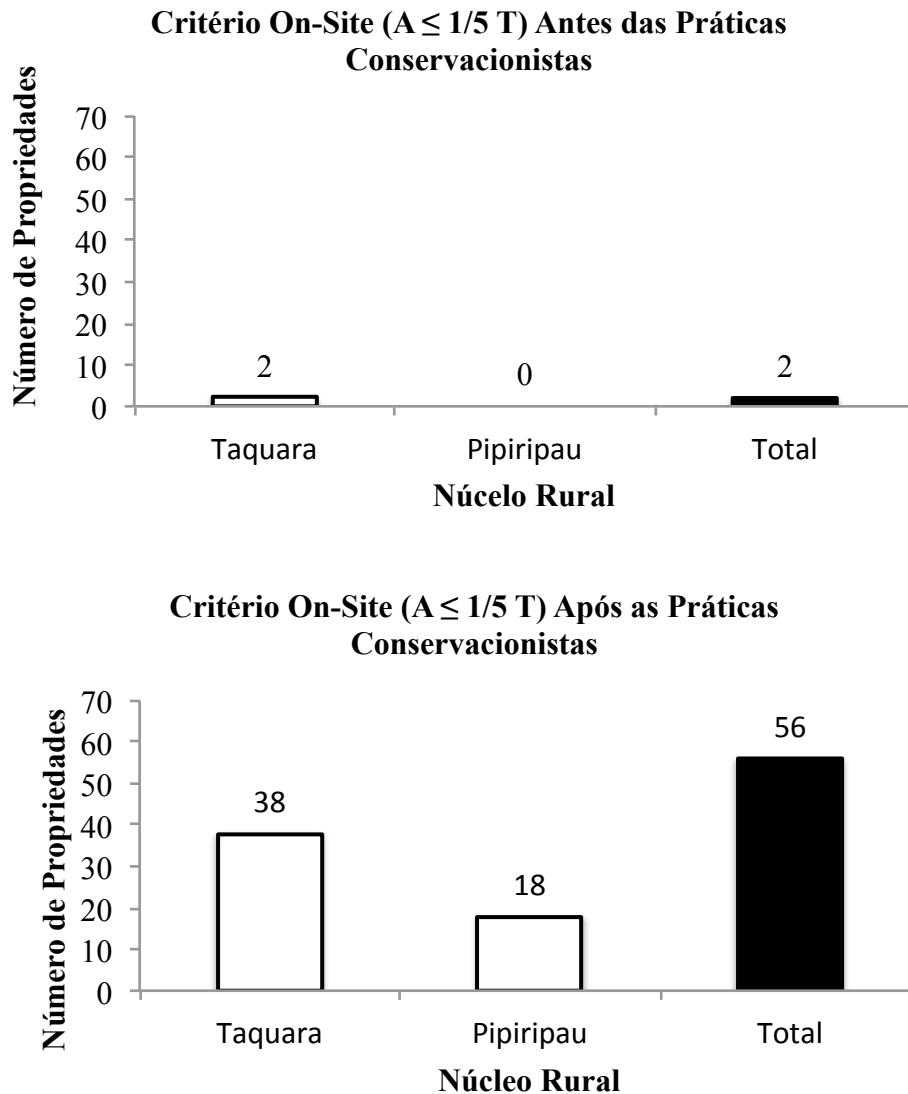


Figura 11. Quantidade de propriedades que atenderam ao critério on-site ($A \leq 1/5 T$).

c) Critério ‘off-site’

No caso do critério ‘off-site’, apenas 5 propriedades atendiam ao limite de 1,0 t ha ano antes da implementação das práticas, mas todas passaram a atender ao critério depois das ações (Figura 12). Este resultado satisfatório reforça a premissa do PPA de que a melhoria realizada dentro da propriedade rural vai gerar melhorias fora dela, gerando benefícios a totalidade da bacia hidrográfica e para a sociedade, é atendida. O limite aceitável de 1 t ha⁻¹ ano⁻¹ para a sedimentação, por sua vez, está muito próximo daquele identificado por Chaves (2012) para a bacia do rib. Pípiripau, na condição de Cerrado natural (ano de 1953). O valor médio de perda de solo naquela ocasião era de 0,7 t / ha⁻¹

ano⁻¹. Assim, o limite de 1 t ha⁻¹ ano⁻¹ atendido pelas propriedades está muito próximo do ótimo de sustentabilidade para a bacia do ribeirão Pipiripau

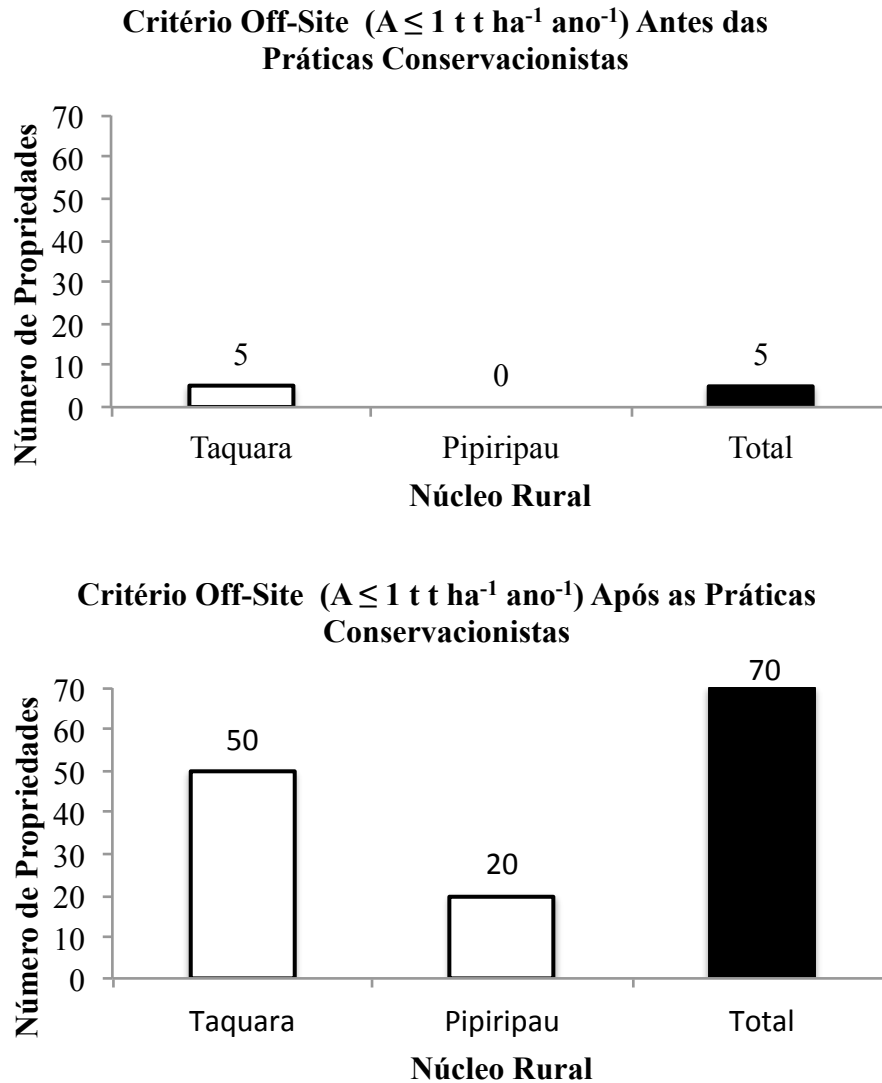


Figura 12. Quantidade de propriedades que atenderam ao critério off-site: $A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no núcleo rural Taquara e no núcleo rural Pipiripau.

4.2 VALORES DE PERDAS DE SOLO, APORTE DE SEDIMENTOS E PERCENTUAL DE ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS ‘ON’ E ‘OFF-SITE’

A Figura 13 mostra o percentual de propriedades a atender aos critérios ‘on’ e ‘off-site’ após a implantação das práticas conservacionistas.

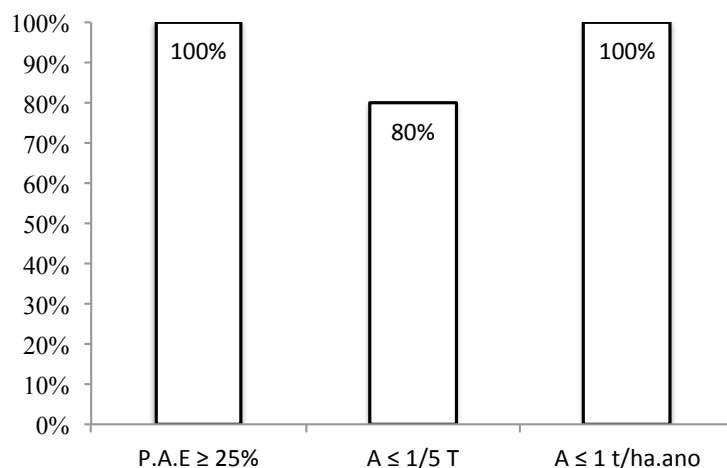


Figura 13. Percentual final de propriedades a atender aos critérios avaliados depois da implantação das práticas conservacionistas.

A Tabela 5 mostra os valores médios de PAE, A/T e Y nas 70 propriedades analisadas.

Tabela 5. Valores médios calculados para as variáveis relativas aos três critérios da análise.

Critério	Variável	Antes ou depois das práticas	Valor	Unidade
Critério P.A.E P.A.E ≥ 25%	P.A.E	Depois	66,2	%
		Antes		
Critério on-site: A ≤ 1/5 T	[A / T]	Antes	1/1,7	-
		Depois	1/7	
Critério off-site: A ≤ 1 t ha ano	[Y]	Antes	5,82	t/ano
		Depois	0,42	
	[A]	Antes	2,2	t ha ⁻¹ ano ⁻¹
		Depois	0,17	

Tendo em vista os resultados percentuais da Figura 13 acima, bem como os valores apresentados na Tabela 5, conclui-se que as 70 propriedades participantes do Programa Produtor de Água apresentaram, até o momento, alta eficiência hidro-ambiental, tanto dentro

como fora da propriedade. Cada um dos três critérios foi atendido, garantindo, portanto, os três serviços hidro-ambientais analisados neste estudo:

- Critério P.A.E ($P.A.E \geq 25\%$): são promovidos benefícios econômicos ao produtor rural
- Critério ‘on-site’ ($A \leq 1/5 T$): não deve haver risco de queda de produtividade agrícola nessas propriedades nas próximas décadas.
- Critério ‘off-site’ ($A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$): não deve haver danos ambientais ao rio e serão mantidas satisfatórias a qualidade e quantidade de água

Resultados semelhantes aos deste estudo foram encontrados por Mullan (2013) ao avaliar os riscos da erosão em bacias hidrográficas da Irlanda do Norte. Este autor também concluiu que não existe risco de queda de produtividade para as próximas décadas, tampouco riscos associados à sedimentação, já que 100% das glebas respeitaram o limite de erosão on-site (definido como “ $A < T$ ”) e 61% respeitam o limite off-site (definido como “ $A \leq 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ”).

5 CONCLUSÃO

- Os critérios de redução da erosão dentro (‘on-site’) e fora (‘off-site’) da propriedade rural mostraram-se eficientes para o estudo dos impactos ambientais gerados em bacias hidrográficas
- As práticas conservacionistas implantadas pelo Programa Produtor de Água em 70 propriedades da bacia do ribeirão do Pipiripau atenderam, ao mesmo tempo, aos três critérios de efetividade.
- As ações conservacionistas nas propriedades, conforme recomendadas nos PIPs, são capazes de garantir uma sustentabilidade hidro-ambiental na bacia.
- Em função de sua facilidade e caráter holístico, a presente análise pode ser aplicada em outros programas de PSA.

6 REFERÊNCIAS

AUSTRALIA DEPARTEMENT OF PRIMARY INDUSTRY. **Soil erosion solutions**. Projeto 'Revegetation/improved management of areas with high erosion risk'. Acesso em http://www.dpi.nsw.gov.au/data/assets/pdf_file/0003/255153/fact-sheet-1-types-of-erosion.pdf, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa “Produtor de Água”**. Brasília, p. 1-65, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual Operativo do Programa Produtor de Água**. 2a edição Brasília, p. 1-84, 2012.

AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Pagamento por Serviços ambientais a produtores rurais do Projeto Produtor de Água no Pípiripau**. Edital 01/2012, p. 1-23, 2012.

AVANZI, J. C., SILVA, M. L. N., CURI, N., MELLO, C.R., FONSECA, S. **Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.12, n.6, p.563–569, 2008.

BAZZOFFI, P. Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. **Regional Environmental Change**, v. 9., p.169-179, 2009.

BRASIL. **Lei 9.433/1997**, de 8 de Janeiro de 1997. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm Acesso em 09/10/2014.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, ANA; THE NATURE CONSERVANCY, TNC; EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO DISTRITO FEDERAL, EMATER; SECRETARIA DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E

ABASTECIMENTO, SEAPA. **Programa Produtor de Água: Relatório de diagnóstico socioambiental da bacia do ribeirão Pípiripau**, p. 1 - 59, 2010.

BRAUMAN, K. A. DAILY, G. C., DUARTE, T. K., MOONEY, H.A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. **The Annual Review of Environment and Resources**, 32: 67-98, 2007.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL (CAESB). **Plano de Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau**. Brasília, p. 1-206, 2001.

CHAVES, H. M. L, 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, vol. 9, n. 3, p. 5-14, 2004.

CHAVES, H.M.L., PIAU, L.P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** vol. 32, p. 333-343, 2008.

CHAVES, H. M. L. Incertezas na predição da USLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.34, p.2021-2029, 2010.

CHAVES, H. M. L. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1469-1477, 2010.

CHAVES, H. M. L. **Avaliação econômica e socioambiental do retorno do investimento da**

implantação do projeto produtor de água na bacia do ribeirão Pípiripau (DF/GO). Relatório de consultoria preparado para o The Nature Conservancy do Brasil – TNC, contrato No. AFCS-BR 00293-2012, 2012.

CHAVES, H. M. L. **Aplicação dos indicadores de impacto, quantificação e valoração dos serviços hidro-ambientais das ações do PPA-Pípiripau, no contexto do Programa Produtor de Água Brasil.** Relatório técnico para a WWF, p. 4-22, 2015.

DAVIES, S., LACEY, A. **Identifying dispersive soils.** Nota 386 da Department of Agriculture and Food, Government of Western Australia. Acesso em <https://www.agric.wa.gov.au/sites/gateway/files/Farmnote%20386%20Identifying%20dispersive%20soils.pdf>, 2015.

DEDECEK, R. A., RESCK, D. V. S., FREITAS J. R., E. **Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em latossolo vermelho-escuro dos cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 10, p. 265-272, 1986.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **A strategy to keep Europe's soils robust and healthy.** 2006. Disponível em http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm

European Community Water Framework Directive (2000/60/EC). Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=EN>

HARR, M.E. **Reliability-based design in civil engineering.** New York, McGraw-Hill, 1987. 290p.

GODECKE, M. V., HUPFFER, H. M., CHAVES, I. R. O futuro dos Pagamentos por Serviços Ambientais no Brasil a partir do novo Código Florestal. **Desenvolvimento do Meio Ambiente**, v. 31, p. 31-42, 2014.

JAIN, M. K., KOTHYARI, U. C. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. **Hydrological Sciences Journal**, v. 45, p. 5, 771-786, 2000.

LANDELL-MILLS, N., PORRAS, I. T. **Silver bullet or fools' gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor**. International Institute for Environment and Development (IIED), London. 2002. Disponível em: <<http://www.cbd.int/doc/external/iied/iied-silver-report-2002-en.pdf>>. Acesso em 2015.

LELE, S. Watershed services of tropical forests: from hydrology to economic valuation to integrated analysis. **Current Opinion in Environmental Sustainability** , 1:148–155, 2009.

LIMA, J. E. F. W., LOPES, W. T. A. , AQUINO, F. G., OLIVEIRA-FILHO, E.C., SANO, E. E., SILVA, F. D. M. **Assessing the use of erosion modeling to support payment for environmental services programs**. Journal of Soils Sediments, p. 1-8, 2013.

LOMBARDI NETO, F. & BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, Boletim Técnico 28, 12p., 1975.

MANNIGEL, A. R., CARVALHO, M. P., MORETI, D. & MEDEIROS, L. R. **Fator de erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo**. Acta Scientiarum, vol. 24, p. 1335- 1340, 2002.

MANAJEN, T., FRIEDMAN, R., MILDER, J. C. **Innovations in Market-based watershed conservation in the United States: payments for watershed services for agricultural and forest landowners**. U.S. Department of Agriculture, Office of Environmental Markets, p. 4 - 39, 2011.

MATA-LIMA, H., VARGAS, H., CARVALHO, J., GONÇALVES, M., CAETANO, H., MARQUES, A., RAMINHOS, C. **Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso.** Rev. Esc. Minas, Ouro Preto , v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007 . Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000300014&lng=en&nrm=iso . Acesso em 2015.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Our Human Planet.** Washington, DC: Island, p. 49 – 69, 2003

MOLDENHAUER, W. C., ONSTAD, C. A. **Achieving specified soil loss levels.** *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 30, p.166–8, 1975.

MONTOMERY, D. R. **Soil erosion and agricultural sustainability.** PNAS, v. 104, p. 13268 – 13272, 2007. Disponível em <http://www.pnas.org/content/suppl/2007/07/26/0611508104.DC1>

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and Conservation.** National Soil Resources Institute, Cranfield University. Third Edition. 2005.

MULLAN, D. **Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems.** *Catena*, vol. 109, p. 234–246, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2013.03.007

NEARING, M. **Toward a new definition of soil loss tolerance for the United States.** *Soil and Water Conservation Society.* 2002. Disponível em http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?SEQ_NO_115=127644.

Acesso em 2015.

OUYANG, D. & BARTHOLIC, J. **Predicting sediment delivery ratio in Saginaw Bay Watershed**. The 22nd National Association of Environmental Professionals Conference Proceedings. 19-23 de maio, p. 659 – 671, 1997.

PATTANAYAK, S. K. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 104, p. 171–184, 2004.

POSTEL, S. L., THOMPSON J. R, B. H. **Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services**. Natural Resources Forum, p. 2998–108, 2005.

QUEENSLAND GOVERNMENT. **Types of erosion**. Outubro de 2015.
<https://www.qld.gov.au/environment/land/soil/erosion/types/>

RIBEIRO, R. **Pipiripau recebe melhorias do Programa Produtor de Água**. Ministério do Meio Ambiente, comunicação. Acesso em <http://www.mma.gov.br/index.php/comunicacao/agencia-informma?view=blog&id=746>. Acesso em 2015.

RODRIGUES, D. B. B., SOBRINHO, T. A., OLIVEIRA, P. T. S., PANACHUKI, E. **Nova abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, p. 1037-1045, 2011.

SKIDMORE, E. L. Determinants fo Soil Loss Tolerance. **American Society of Agronomy**. **Madison: ASA**, p.87-93, 1982.

STANTON, T., ECHAVARRIA, M., HAMILTON, K.; and OTT, C. **State of Watershed Payments: An Emerging Marketplace**. Ecosystem Marketplace. 2010 Disponível em: http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2438.pdf

TELLES, S. T., GUIMARÃES, M. F. & DECHEN, S. C. F. **The costs of soil erosion**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.35, p.287-298, 2011

TELLES, S. T., DECHEN, S. C. F., Souza, L. G. A. & GUIMARÃES, M.F. **Valuation and assessment of soil erosion cost**. Scientia Agricola, vol.70, p.209-216, 2013.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade Universidade Federal do Rio Grande do Sul Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, p. 1 – 668, 1998.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP-, CARIBBEAN ENVIRONMENT PROGRAMME -CEP. **Best Management Practices for Agricultural Non-Point Sources of Pollution**. CEP Technical Report 41, 1998 - <http://www.cep.unep.org/publications-and-resources/technical-reports/tr41en.pdf/view>

VAN-CAMP, L., BUJARRABAL, B., GENTILE, A-R., JONES, R. J. A., MONTANARELLA, L., OLAZABAL, C. & SELVARADJOU, S-K. **Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection**. EUR 21319 EN/2, p. 1- 872. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2004.

VERHEIJEN, F. G. A., JONES, R. J. A., RICKSON, R. J. & SMITH, C. J. **Tolerable versus**

actual soil erosion rates in Europe. Earth Science Reviews, n.o. 1-4, v. 94, p. 23-38, 2009.

WALLING, D.E. **Measuring sediment yield from river basins.** In: LAL, R., ed. Soil erosion research methods. Ankeny, SWCSA, 1988. p.39-74.

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, vol. 32, p. 801-814, 2008.

WISCHMEIER, W. H. Use and misuse of the universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 31, p.5-9, 1976.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning.** Washington, USDA, 58p, 1978. (USDA AH-537).

ZHAO, G., MU, X., WEN, Z., WANG, F., GAO, P. **Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China.** Land Degradation and Development, vol. 24, p. 499–510, 2013.