







Artigos

Pagamento por Serviços Ambientais e práticas conservacionistas do solo: estudo de caso em uma propriedade rural inserida na sub-bacia Hidrográfica do Rio Turvo - MG

Payment for Environmental Services and soil conservation practices: a case study on a rural property in the Rio Turvo sub-basin, MG

**Luiza Maria Affonso Lopes Silva^I , Rodrigo Nobre Santana^I ,
Sady Júnior Martins da Costa de Menezes^I , Getúlio Fonseca Domingues^{II} ,
Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro^{III} , Alexandre Rosa dos Santos Rosa^{IV} **

^IUniversidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil

^{II}Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

^{III}Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

^{IV}Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil

RESUMO

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) oferece incentivos econômicos para a implementação de práticas conservacionistas, recompensando aqueles que mantêm serviços ambientais ecossistêmicos. O objetivo deste trabalho consiste em indicar práticas conservacionistas em uma propriedade rural que esteja apta para o PSA, utilizando a aplicação do modelo USPED (Unit Stream Power Erosion and Deposition) e a metaheurística Algoritmo Genético (AG) para identificar as áreas potenciais de erosão e deposição de sedimentos. Foram gerados mapas de uso do solo, declividade e áreas de preservação permanente (APP) com dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR), do Código Florestal Brasileiro e do uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Realizou-se o cálculo do modelo USPED para obter a taxa líquida de erosão/deposição do solo. A otimização das zonas de vegetação foi realizada usando a metaheurística Algoritmo Genético (AG), programado em Python, obtendo as áreas que minimizam a erosão por meio da locação das zonas de vegetação na propriedade rural. Os resultados indicam que a implementação de práticas conservacionistas, como sistema de plantio direto e implementação da integração lavoura-pecuária-floresta, são essenciais para abater a erosão em até 60 % e melhorar a fertilidade do solo. A análise de uso do solo revelou a necessidade de restaurar 6,7 ha de áreas de APP. A adoção dessas práticas conservacionistas e a participação em programas de PSA podem significativamente reduzir a erosão e melhorar a qualidade do solo e da água na região.

Palavras-chave: Análise da paisagem; Modelagem ambiental; Serviço ecossistêmico

ABSTRACT

Payment for Environmental Services (PSA) offers economic incentives for the implementation of conservation practices, rewarding those who maintain ecosystem environmental services. The objective of this work is to indicate conservation practices on a rural property that is suitable for PSA, using the application of the USPED model (Unit Stream Power Erosion and Deposition) and the Genetic Algorithm (GA) metaheuristic to identify potential areas of erosion and sediment deposition. Maps of land use, slope and permanent preservation areas (APP) were generated with data from the Rural Environmental Registry (CAR), the Brazilian Forest Code and the use of the Geographic Information System (GIS). The USPED model was calculated to obtain the net soil erosion/deposition rate. The optimization of vegetation zones was carried out using the Genetic Algorithm (GA) metaheuristic, programmed in Python, obtaining areas that minimize erosion through the location of vegetation zones on the rural property. The results indicate that the implementation of conservation practices such as a direct planting system and the implementation of crop-livestock-forest integration are essential to reduce erosion by up to 60% and improve soil fertility. The land use analysis revealed the need to restore 6.7 ha of APP areas. Adopting these conservation practices and participating in PES programs can significantly reduce erosion and improve soil and water quality in the region.

Keywords: Landscape analysis; Environmental modelling; Ecosystem service

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos houve o aumento da degradação das características do solo em decorrência do seu uso intensivo e descaso com as práticas conservacionistas (Bertol, 2016). Estas indicam que ao manejar o solo se mantenha ou melhore a sua condição através da cobertura do terreno, correções de níveis adequados de fertilidade, construção de terraceamento, barragens, entre outros.

Também é possível perceber a eficiência aumentada das práticas conservacionistas na medida em que forem implantadas de forma coordenada e integradas entre si, respeitando a particularidade do ecossistema onde for inserida.

Como forma de incentivo as adoções dessas práticas conservacionistas têm-se um instrumento importante, o pagamento pelos serviços ambientais (PSA), que agrega incentivos econômicos, utilizando as forças de mercado por meio de relações contratuais, para melhorar ou manter a qualidade ambiental. Este possibilita tomadas de decisões em temáticas envolvendo as práticas conservacionistas, sendo considerado um programa eficiente, pois recompensa quem produz ou mantém

serviços ambientais ecossistêmicos e incentiva quem não promoveria na ausência de estímulo monetário (Naeem *et al.*, 2015; Santos; Silvano, 2016; Periotto; Tundisi, 2018; Simedo *et al.*, 2020).

A sistematização do PSA contempla serviços de provisão, regulação, cultural e suporte, tendo enfoque em um benefício específico ou em múltiplos (Fidalgo *et al.*, 2017). Dessa maneira, para se regularizar e nortear a implementação da política pública de PSA, foi sancionada pelo Governo Federal a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), por meio da Lei nº 14.119/2021 (Brasil, 2021). Essa lei é de suma importância para o avanço do desenvolvimento sustentável do país, pois dialoga em torno da temática de serviços ambientais e permite um alinhamento entre os diversos setores, especialmente entre agricultura e meio ambiente (Coelho *et al.*, 2021).

Neste artigo, propõe-se a implementação das práticas conservacionistas no solo com base no instrumento PSA e utilizando para o planejamento espacialmente explícito o Sistema de Informação Geográfica (SIG) para mapear o processo erosivo do solo que age sobre aquele ambiente através de modelos e parâmetros que se integram em uma ferramenta útil na estimativa de cenários ao longo do tempo.

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (Wischmeier; Smith, 1965; Wischmeier; Smith, 1978) é um modelo para estimar a perda média anual de solo. Sua versão revisada (RUSLE) (Renard, 1997) inclui o parâmetro do mapa de erosividade para os Estados Unidos. Juntamente, esses dois modelos são os mais difundidos para o cálculo da erosão do solo a longo prazo (Borrelli *et al.*, 2020; Godoi; Borrelli; Oliveira, 2021). O autor Williams (1975) desenvolveu uma versão modificada da USLE, chamada de MUSLE (Equação Universal Modificada da Perda de Solo), baseado nas características do escoamento superficial (Sadeghi *et al.*, 2014).

O modelo Unit Stream Power Erosion and Deposition (USPED) (Mitasova *et al.*, 1996), também uma derivação da USLE, expõe uma característica distintiva entre os citados, pois ele prevê não apenas a distribuição espacial da erosão, mas também as taxas de deposição sob condições de fluxo laminar e sulcos em terrenos convergentes e divergentes em grandes áreas e com alta precipitação (Domingues, 2018; Oliveira; Neto; Pereira, 2022).

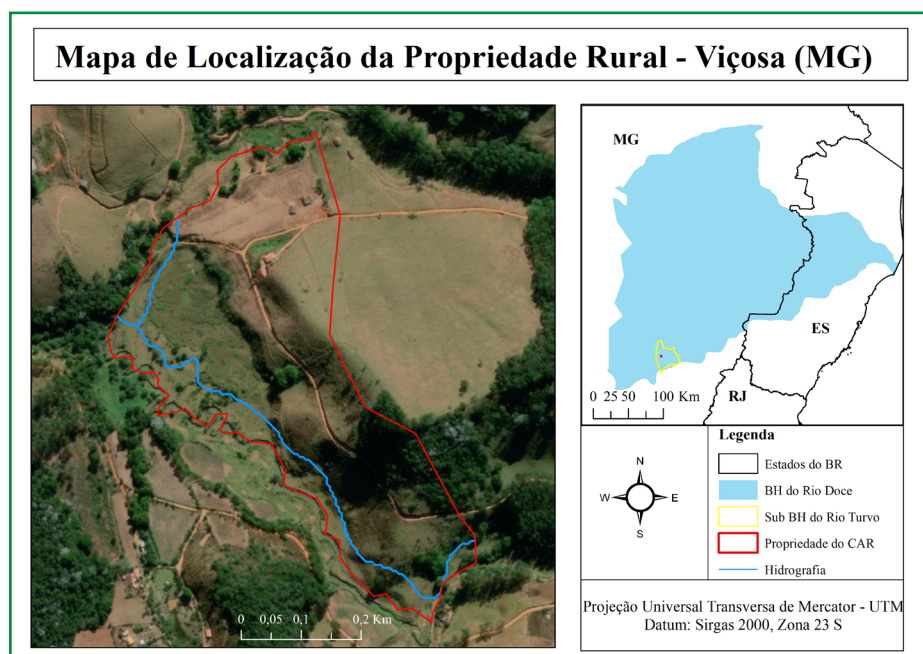
No contexto apresentado, o objeto de estudo para a modelagem USPED será na sub-Bacia Hidrográfica do Rio Turvo (BHRT), localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, no estado de Minas Gerais. O modelo possibilitará um auxílio ao pagamento de serviços ambientais (PSA) subsidiando o planejamento espacial de técnicas conservacionistas para uma propriedade alocada na bacia.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O presente estudo situa-se na Região Hidrográfica Atlântico Sudeste - Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), precisamente na sub-Bacia Hidrográfica do Rio Turvo (BHRT) no Estado de Minas Gerais (MG) como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Mapa de localização da propriedade do CAR



Fonte: Autores (2024)

A região apresenta predominantemente relevo de suave ondulado a forte ondulado. O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo

Distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (Santos *et al.*, 2018). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região enquadra-se no tipo Cwa e Cwb (clima de inverno seco e verão chuvoso).

Utilizou-se uma propriedade do cadastro ambiental rural (CAR) no município de Viçosa - MG para investigar seus diferentes cenários quanto ao uso e cobertura do terreno, presença de área de preservação permanente (APP), declividade, modelagem de erosão/deposição a metaheurística Algoritmo Genético (AG) para melhor determinação das práticas conservacionistas *in loco* na propriedade. Toda a geração de mapas e correlações de dados foram feitas através do *software ArcGis*.

2.2 Unit Stream Power Erosion and Deposition (USPED)

O modelo USPED descrito nas equações abaixo resulta em valores de erosão e deposição do solo. Estima-se a mudança no fluxo de sedimentos na direção da inclinação mais íngreme, o que indica se um dado local age como fonte ou depósito de sedimentos. A partir da multiplicação de índices que consideram o efeito dos fatores: chuva, solo, topografia, cobertura e manejo do solo, e práticas conservacionistas adotadas obteve-se a Equação (1), calculando o fluxo de sedimentos expresso em $\text{ton.m.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

$$T = R.K.C.P.U^m.(\sin \beta)^\eta \quad (1)$$

onde: T é o fluxo de sedimentos ($\text{ton.m.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); R é o fator de erosividade da chuva ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); K é o fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg.hr. MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); C é o fator de uso/manejo do solo (adimensional); P é práticas conservacionistas adotadas (adimensional); U é a área de contribuição por unidade de largura ($\text{m}^2.\text{m}^{-1}$); β é o ângulo de inclinação em graus;; m e η são parâmetros do impacto de diferentes tipos de fluxo e propriedade do solo.

Na Equação (2), será calculada a taxa líquida de erosão/deposição, a partir de uma mudança no fluxo de sedimentos (Mitasova *et al.*, 1996; Mitas; Mitasova, 1998; Domingues, 2018). No caso de transporte limitado do solo, se o desprendimento do

solo exceder a capacidade de transporte de sedimentos do escoamento superficial, o fluxo de sedimentos será igual a capacidade de transporte de sedimentos.

$$ED = \frac{d(T \cdot \cos(a))}{dx} + \frac{d(T \cdot \sin(a))}{dy} \quad (2)$$

onde: ED é a TAXA Líquida de Erosão/Deposição; T é o fluxo de sedimentos; A é a Orientação da superfície do terreno (graus).

2.3 Metaheurística Algoritmo Genético (AG)

Segundo Domingues (2018), o AG é um algoritmo de busca estocástico inspirado na evolução e simula uma população inicial, em que os indivíduos mais aptos sobrepuja os demais, utilizando-se dos mecanismos naturais da evolução: seleção, cruzamento e mutação (Goldberg; Holland, 1988; Holland, 1992; Scrucca, 2013).

O objetivo do AG é minimizar a erosão e aumentar a deposição ao longo da área da bacia, a diferença da soma desses dois valores é chamada de *fitness*. Se uma determinada célula contribui significativamente para o aumento da deposição, quando alocada nas regiões côncavas, esta é selecionada pelo modelo como um local adequado para alocar a zona de vegetação. Sendo a erosão maior que a deposição ao longo da bacia, o seu somatório resultará num valor negativo, logo, o conjunto desses valores determinarão a localização das zonas de vegetação (Santana, 2023).

De acordo com o proposto por Domingues (2018), a otimização das zonas de vegetação foi desenvolvida em linguagem de programação Python, seguindo o formato de matriz nativa da biblioteca Numpy (Van Der Walt; Colbert; Varoquaux, 2011). A biblioteca será aplicada para as operações básicas envolvendo matrizes, operações matemáticas, acesso aos índices e álgebra booleana.

Para um estudo integrado da BHRT, a partir da análise de Santana (2023) tendo os valores processados com o AG, foram utilizados como base (dados secundários) para que pudesse fazer a devidas ações de propostas para as práticas conservacionistas e pagamento por serviços ambientais na área de estudo.

2.4 Uso e ocupação do terreno

Utilizou-se os dados do MapBiomas (2021) – coleção 6, que forneceu 25 classes de uso e cobertura da Terra no período de 1985 – 2020 para toda área de estudo.

2.5 Área de Preservação Permanente (APP)

A Lei de Proteção da Vegetação Nativa n. 12.651/12 (Brasil, 2012) regulamenta o uso, a proteção de florestas e demais tipos de vegetação nativa dos imóveis rurais privados. Os dois principais mecanismos do Código Florestal para a proteção e regulamentação do uso da vegetação nativa são as Reservas Legais (RL) e as Áreas de Proteção Permanentes (APPs).

A análise sobre essas áreas e mecanismos aqui listados deu-se por meio de análise espacial utilizando de ferramentas de SIG e seguindo o Código Florestal vigente, determinando assim uma faixa de 30 m destinados à proteção e/ou recuperação dessas áreas em todos os cursos d'água, pois a hidrografia da BHRT, adotada nesta pesquisa, tem caráter unifilar e com uma largura inferior a 10 metros em toda extensão de sua análise (área de estudo). Esta metodologia abrange também para o cálculo de raio das nascentes e para a declividade superior a 45°, fazendo uma seleção das classes de declividade escarpado (>75%) segundo Lepsch (1991), que atendem a obrigatoriedade exigida.

2.6 Classes de declividade

Os dados da classe de declividade foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) por interpolação de dados cartográficos (vetores) do IBGE (Zanetti *et al.*, 2022), sendo estes dados de hidrografia, curva de nível e pontos cotados, gerando um modelo matricial (raster) com resolução espacial de 10 metros. Foram nomeadas em sete classes de relevo segundo o Manual Para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso (1991).

Lepsch (1991), o autor do manual, cita que a capacidade de uso da terra pode ser conceituada como a adaptabilidade da terra às diversas formas de utilização agrícola, sem que ocorra o depauperamento do solo pelos fatores de desgaste e empobrecimento.

As discussões acerca desta metodologia tornam-se importantes sobre a utilização de equipamentos agrícolas mecanizados e conhecer as inferências da suscetibilidade dos solos à erosão, adequando de forma eficiente as práticas conservacionistas para cada classe do solo.

2.7 Cadastro Ambiental Rural (CAR)

O CAR é um registro público eletrônico nacional, obrigatório para todos os imóveis rurais. Neste trabalho foram utilizados os dados com o intuito de analisar a propriedade nos componentes: área do imóvel, APP, reserva legal e a vegetação nativa.

2.8 Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)

Neste estudo foi apresentado o método indireto de valoração ambiental, o custo de oportunidade, que é o que se ganha ao não degenerar aquela área. Mensuraram-se perdas de renda, por meio de recursos substitutos, aplicando a metodologia abaixo para um recorte da BHRT, aplicado para uma propriedade oriunda do CAR.

O Programa Produtor de Água da ANA, pioneiro na temática PSA, sugere a metodologia de estimativa do percentual de abatimento de erosão (P.A.E) descrita na Equação 3 para auxílio nas escolhas de áreas a serem implementadas e precificadas no Manual Operativo ANA (2008).

$$\text{P.A.E (\%)} = 100 (1 - \Phi 1 / \Phi 0) \quad (3)$$

onde: $\Phi 1$ Fator de risco de erosão proporcionado pelo uso e manejo atual; $\Phi 0$ Fator de risco de erosão proposto.

Por fim, também foi utilizado o custo de oportunidade praticado no PSA “Guardião Dos Igarapés: Programa de Produção e Conservação Das Águas”, de acordo com a Tabela 1, considerando os critérios de cobertura vegetal e PC em relação à área da propriedade para composição dos pagamentos aos produtores rurais.

Tabela 1 – Valores PSA de acordo com Igarapé (2015) – simplificada pela autora

PSA por Hectare/Ano						
Propriedades:	I – Cobertura Florestal			II – Agricultura Sustentável / Pecuária Sustentável		
	A	B	A e B	A	B	A e B
2 ha a 20 ha	R\$ 300,00	R\$ 150,00	R\$ 450,00	R\$ 150,00	R\$ 50	R\$ 200,00
20 ha a 40 ha	R\$ 200,00	R\$ 100,00	R\$ 300,00	R\$ 100,00	R\$ 50,0	R\$ 150,00
> 40 ha	R\$ 300,00	R\$ 150,00	R\$ 450,00	R\$ 75,00	R\$ 25,00	R\$ 100,00

Fonte: Igarapé (2015); Autores (2024)

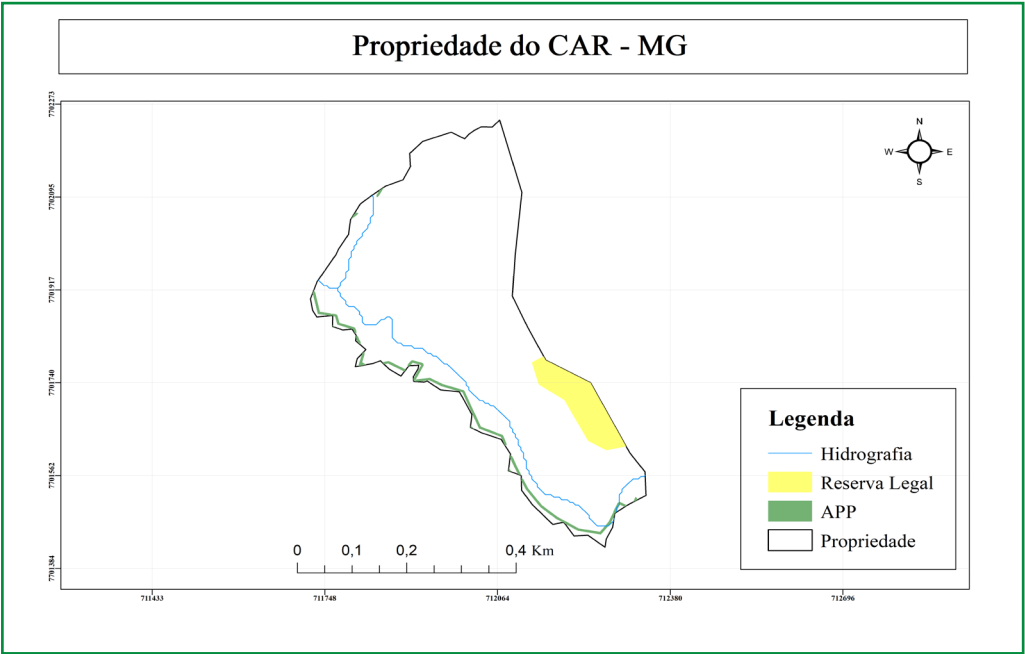
Em que: I. Cobertura florestal: A) Implantação e manutenção da cobertura florestal das Áreas de Preservação Permanente; B) Cobertura Florestal acima de 25% da área da propriedade. II. Agricultura sustentável: A) Adoção de práticas conservacionista de solo, com a finalidade de abatimento da erosão e da sedimentação e uso adequado da água (terraço e barraguinhas); B) Práticas agrícolas sustentáveis (sistema agroflorestal, agricultura orgânica, pastejo rotacionado, irrigação).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Área da propriedade rural de estudo

Com os dados oriundo da plataforma CAR, declarado pelo proprietário, tem-se uma propriedade com área de 20,48 ha, sendo 1,13 ha de reserva legal (Figura 2). Entretanto não consta área de APP como exigido no Código Florestal (Brasil, 2012) ao entorno do córrego de água, apenas uma pequena faixa que não contempla a legislação.

Figura 2 – Propriedade selecionada para estudo no Município de Viçosa – MG

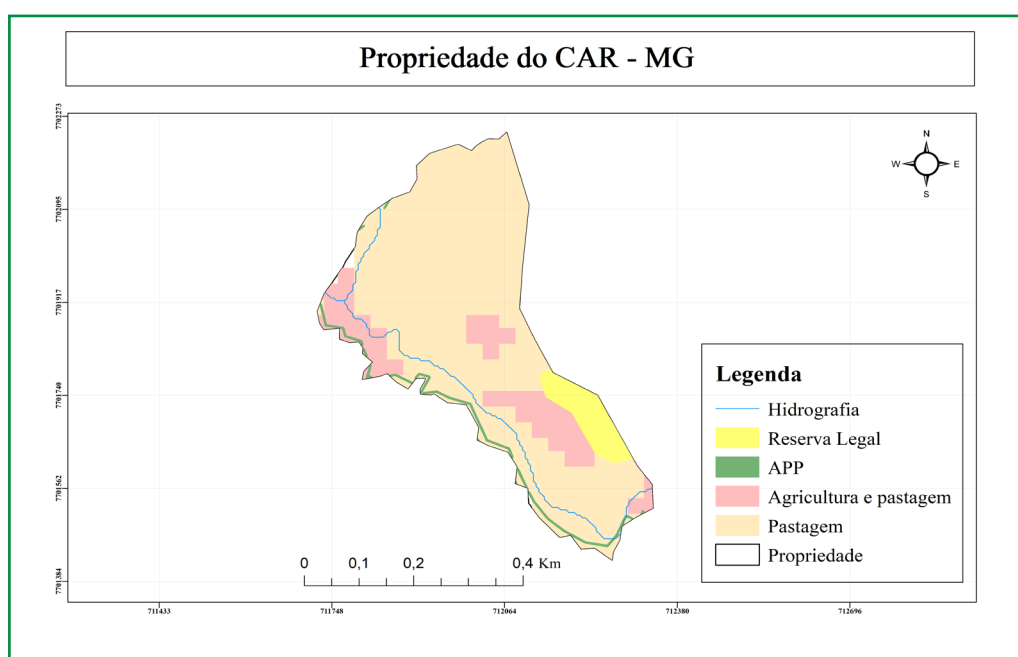


Fonte: Autores (2024)

3.2 Análise em relação ao uso e cobertura do terreno, declividade e práticas conservacionistas na propriedade rural.

No local há a predominância das classes Pastagem e Agricultura e Pastagem no uso e cobertura do solo (Figura 3), como predomina na Bacia Hidrográfica do Rio Turvo (Silva, 2023).

Figura 3 – Uso do solo e APP para a propriedade de estudo



Fonte: Autores (2024)

Para se enquadrar na Lei Federal n. 12.651/12, a propriedade deveria assumir 30 m nas margens do rio de cobertura florestal, necessitando de uma área de 6,7 hectares a serem restauradas.

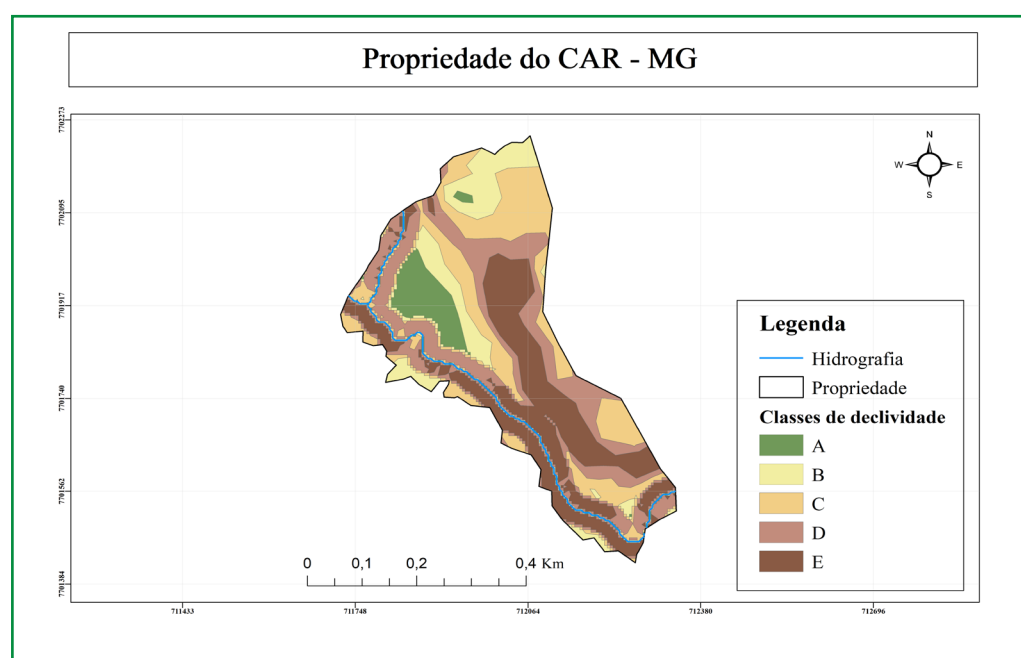
A propriedade apresenta uma declividade com maior predominância nas classes ondulado, colinoso e forte ondulado, apresentada na Tabela 2 com a área correspondente e na Figura 4 com a localização das mesmas, nas siglas D, C e E, respectivamente.

Tabela 2 – Classes de relevo para a propriedade de estudo

Classes do Relevo	Nível de declive (%)	Área (Km²)
A – Plano	<2	0,014
B – Suave Ondulado	2-5	0,027
C – Ondulado	5-10	0,053
D – Colinoso	10-15	0,054
E – Forte Ondulado	15-45	0,056

Fonte: Autores (2024)

Figura 4 – Classes de declividade para a propriedade de estudo



Fonte: Autores (2023)

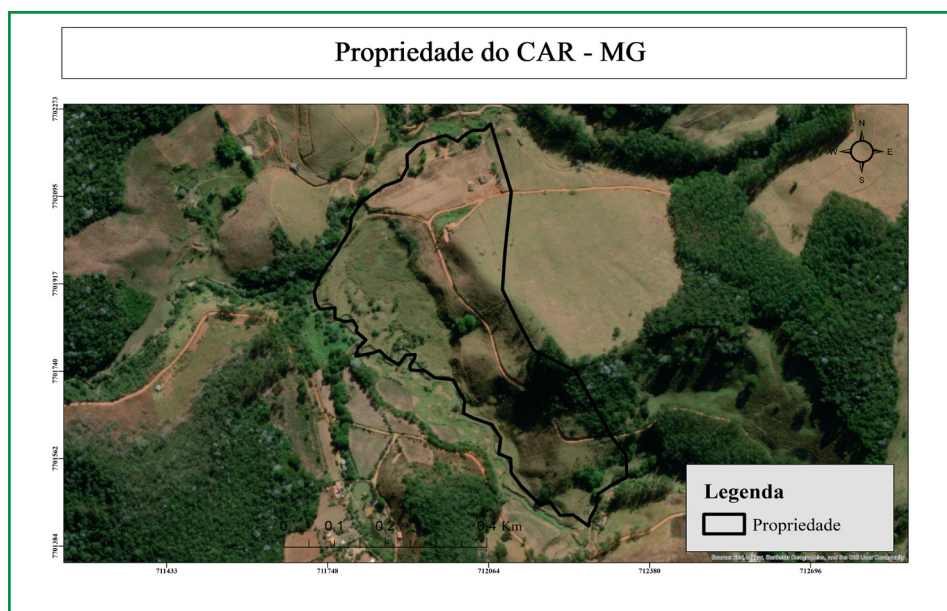
Segundo Nascimento (2020) e Bertoni e Lombardi Neto (2017), é necessário classificar as terras conforme o sistema de capacidade de uso do solo, se assegurando na influência das características física do solo, devido aos riscos de erosão, às limitações de uso, à capacidade produtiva e às necessidades de manejo do solo, agrupando as áreas em classes que demonstram as limitações agrícolas e demais riscos para a sua utilização.

Essas áreas apresentam algumas restrições nas utilizações de maquinário e práticas agrícolas, sugere-se o sistema de plantio direto e integração lavoura-

pecuária-floresta para o melhoramento do uso e cobertura do terreno. A pastagem é predominante, como apresentado na Figura 3, e para a classe Agricultura e Pastagem sugere-se plantio em curva de nível, adubação verde e barragem para o controle e prevenção da erosão do solo.

Na Figura 5, apresentada abaixo, foi utilizada uma imagem de satélite para análise foto interpretativa do terreno, visualizando sob a superfície poucas áreas arborizadas e a presença em sua maior parte de pastagem, reforçando a necessidade das práticas conservacionistas citadas anteriormente para incorporação de matéria orgânica na matriz do solo, corroborando assim para o aumento da fertilidade, menor compactação via maior aeração. Consequentemente, essas modificações diminuem o arraste de sedimentos, por retenção destes na vegetação e incorporação ao longo do terreno, preservando o leito do rio presente na propriedade.

Figura 5 – Imagens de satélite para a área de estudo



Fonte: Autores (2024)

No Brasil, o estudo sobre os impactos da erosão apresentado por Polidoro (2020), tomando-se como referência o ano de 2017, diz que no setor agropecuário foi ocupado em 9,5% (80,8 milhões de ha) com agricultura e 21% (178,7 milhões de ha) com

pastagem no território nacional. Caso essa produção fosse feita com monoculturas, preparo convencional de solo e sem práticas conservacionistas, estima-se uma perda anual de solo por erosão de cerca de 3 bilhões de toneladas, sendo deste valor 29,5 % proveniente da agricultura e 61,4 % da pastagem.

Considerando-se quando uma tonelada de solo é erodida, perde-se além do solo, diversos insumos (adubos, sementes, plantas), ocasionando prejuízo ao agricultor de produtividade, financeiro e ao ecossistema com assoreamento de rios e contaminações do lençol freático com insumos.

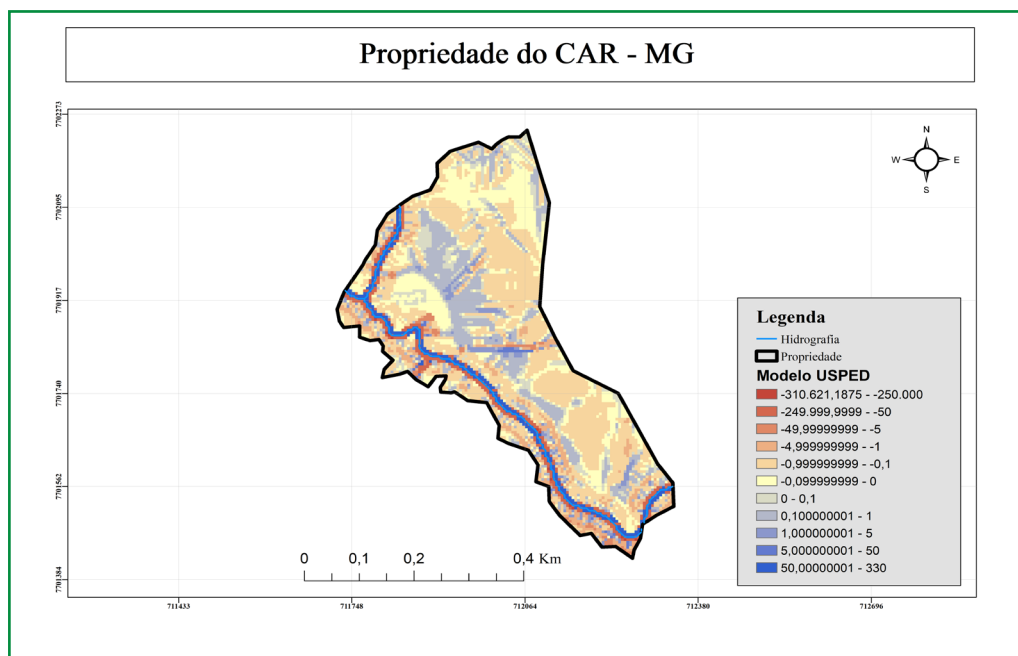
Sendo assim, mostra-se necessária a elaboração de um diagnóstico detalhado das áreas a serem restauradas com as práticas conservacionistas, de acordo com a aptidão do terreno (Schneider *et al.*, 2023). Além disso, pode-se melhorar os serviços ecossistêmicos através da inclusão do terreno em programas de PSA.

3.3 Modelo USPED e Metaheurística Algoritmo Genético (AG)

No modelo USPED e AG apresentado na Figura 6, têm-se os valores positivos e negativos referente à deposição e à erosão do solo, respectivamente. O solo desprendido por causa do impacto da chuva e pela força de cisalhamento do escoamento superficial é transportado pelo fluxo de água até a sua capacidade de transporte decrescer ao ponto de ocorrer a deposição dos sedimentos. Na propriedade analisada, o processo de deposição ocorreu no leito do rio, confirmando a importância do Código Florestal (2012) sobre a localização necessária de 30m APP ao longo na margem do manancial hídrico para diminuir este arraste de sedimento até o corpo hídrico.

As práticas conservacionistas para o controle do escoamento superficial visam à redução do desgaste do solo pelo processo erosivo, resultando na redução da poluição dos mananciais por sedimentos ou insumos agrícolas e na regularização do regime hídrico da bacia hidrográfica. Propõem-se para a área de estudo o plantio em curva de nível que consiste em dispor as fileiras das plantas e executar todas as operações de cultivo no sentido transversal ao pendente, em curvas de nível (seguindo as cotas altimétricas) ou linhas em contorno.

Figura 6 – Modelo de Erosão/Deposição com Metaheurística Algoritmo Genético (AG) para a área de estudo



Fonte: Autores (2024)

É essencial a adoção de faixas de vegetação permanente, que consistem em faixas ou cordões de vegetação permanente em fileiras de plantas perenes e de crescimento denso, dispostas com determinado espaçamento horizontal e sempre em nível. Uma de suas funções é diminuir a velocidade de escoamento da água sobre a superfície do terreno, e a deposição de sedimentos transportados, consequentemente facilitando a infiltração da água que escoar no terreno, evitando a erosão hídrica.

Existem também as práticas conservacionistas que melhoram a biota do solo, provocando uma maior atividade microbiana e aeração via presença de micro e macro poros, tendo assim maior infiltração de água, retenção de umidade na matriz do solo, desenvolvimento vegetativo aérea e radicular, maior decomposição e mineralização da matéria orgânica e ganho quanto à redução e aporte de sedimento no sistema, diminuindo o efeito erosivo sobre o solo.

3.4 Pagamentos por serviços ambientais (PSA)

Na grande maioria dos editais dos programas de PSA feitos no Brasil, tendo como alguns exemplos o Projeto Conexão Mata Atlântica, Fundação Renova, Rede Oasis, Produtores de águas – ES, Produtores de Água e Floresta (PAF), Comitê Guandu - RJ, Projeto Guardiã dos Igarapés, entre outros, é citada a necessidade dos produtores estarem cadastrados ou se dispor ao CAR, destacando a importância deste instrumento para análises integradas da paisagem.

De acordo com o Manual de PSA da ANA, foram utilizados os valores do fator de risco da erosão proporcionado pelo uso e manejo atual (Φ_0) de 0,25 (equivalente à pastagem degradada), e do fator de risco da erosão proposto (Φ_1) de 0,10 (práticas conservacionista integrando pastagem com rotação com grãos), resultando em um cenário comparativo entre o uso atual do solo e após a aplicação das práticas conservacionistas, no cálculo do P.A.E.(%) (Equação 3) com 60% a menos de erosão para a propriedade rural, caso adote medidas conservacionistas citadas ao longo desse trabalho na área.

O Manual da ANA (2008) também destaca a lógica de que abatendo-se um percentual da erosão em uma gleba ou propriedade da bacia, a sedimentação referente a essa gleba será reduzida na mesma proporção, ou seja, influenciando em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Turvo.

Para um aumento de áreas verdes, melhora da erosão do solo e enquadramento da legislação do código florestal (2012) na propriedade, é necessário reflorestar 6,7 ha nas margens dos mananciais hídricos presentes no terreno. Essa condição enquadra a propriedade em um edital de PSA, validado através dos serviços ecossistêmicos de regulação (regulação climática, biológica, danos naturais e purificação da água) e provisão (alimentos e água).

Os programas oferecem ao proprietário auxílio financeiro, técnico e de suprimentos com material de cercamento e mudas de plantas nativas após um ano das medidas terem sido implementadas.

Por fim, seguindo a valoração do Projeto Guardião dos Igarapés – MG (2015) e aplicando o método de custo de oportunidade que contabiliza apenas os fatores de produção econômica e mudanças físicas que terá de ser realizada em uma área reservada da propriedade (Oliveira; Reis, 2020), tem-se de acordo com a Tabela 1, em propriedades maiores de 20 ha até 40 ha, no tópico I – Cobertura Florestal, o enquadramento no subtópico A e B, pois a cobertura florestal que necessita ser implementada fica acima de 25%, resultando em R\$ 300,00. O tópico II – Agricultura sustentável/pecuária sustentável - também se enquadraria no subtópico A e B resultando em R\$ 150,00, totalizando um benefício de R\$ 450,00 ha por mês na propriedade, tendo um valor máximo de R\$ 9.000,00 anualmente.

4 CONCLUSÕES

A propriedade rural apresentou um relevo variando de 5 – 45%, com uso e cobertura do terreno predominantemente nas classes pastagem e agricultura e pastagem. A ausência de 6,7 ha de área de preservação permanente evidencia a necessidade de adequação ao Código Florestal. O modelo USPED e a metaheurística algoritmo genético indicaram melhores locais para implementação de práticas conservacionistas para redução do processo erosivo do solo.

O percentual de abatimento da erosão reduziu em até 60% com aplicação do sistema de plantio direto e implementação da integração lavoura-pecuária-floresta na classe de pastagem no uso e cobertura do terreno.

A metodologia permite a reprodutibilidade da análise nas demais propriedades ao entorno, influenciando melhorias em toda Bacia Hidrográfica do Rio Turvo e demais sub-bacias que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Além disso, a metodologia pode ser adaptada para outros contextos regionais do Brasil.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Agência Nacional de Águas - Brasil (ANA), processo nº 88887.124077/2016-00, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq), processo nº 407299/2017-3.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL) - ANA. **Manual Operativo do Programa produtor de Água** / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Usos Múltiplos. Brasília: ANA, 60 p., 2008.

BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do solo**. 10^a ed. São Paulo: Ícone, 2017.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C.; WUEPPER, D.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, p. 21994- 22001, 2020. DOI: [10.1073/pnas.2001403117](https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117).

BRASIL. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 38 p., 2012.

BRASIL. **Lei nº 14.119**, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nº 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 1, 10 p., 2021.

COELHO, N. R.; GOMES, A. D. S.; CASSANO, C. R.; PRADO, R. B. Panorama das iniciativas de pagamento por serviços ambientais hídricos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, 2021. DOI: [10.1590/S1413-415220190055](https://doi.org/10.1590/S1413-415220190055).

DOMINGUES, G. F. **Otimização de zonas de vegetação para minimizar a perda de solos em bacias hidrográficas**. 2018. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 41 p., 2018.

FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; SCHULER, A. E. **Manual para Pagamento por Serviços Ambientais Hídricos**: seleção de áreas e monitoramento. Brasília-DF: Embrapa, 84 p., 2017.

FUNDAÇÃO GRUPO BOTICÁRIO DE PROTEÇÃO À NATUREZA (FGBPN), 2011. **Project Oasis** – Apucarana – Resumo Executivo. Curitiba - Paraná.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Edital de adesão de produtores rurais aos programas de restauração florestal**. 2021 Disponível em: https://www.fundacaorenova.org/wpcontent/uploads/2021/11/edital_2021_programas_restauracao_florestal_permanente.pdf. Acesso em: jan.2023.

GODOI, R. F.; RODRIGUES, D. B.; BORRELLI, P.; OLIVEIRA, P. T. S. High-resolution soil erodibility map of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146673, 2021.

GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. Genetic Algorithms and Machine Learning. **Machine Learning**, v. 3, n. 2, p. 95–99, 1988.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. Design hydrology and sedimentology for small catchments. **Elsevier**, 1994.

HOLLAND, J. H. Genetic algorithms. **Scientific American**, v. 267, n. 1, p. 66–73, 1992.

IGARAPÉ. **Guardião Dos Igarapés**: Programa de Produção e Conservação Das Águas. Instrução Normativa SEMA n. 01 de 23 de julho de 2015. Diário oficial – Ano I, n. 353, julho de 2015. Disponível em: https://www.igarape.mg.gov.br/abrir_arquivo.aspx/Diario_Oficial_n_353_2015?cdLocal=2&arquivo={2CC5ABEC-B64C-BE2D-C1AE-ACCCC6BA7DA0}.pdf#search=projeto%20guardi%C3%A3o%20dos%20igarap%C3%A9s. Acesso em: nov. de 2022.

LEPSCH, I.F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C.R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 2º ed. Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 175 p., 1991.

MAPBIOMAS - **Coleção Mapbiomas (2021)** – Coleção 6. 2021. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 2 mai. 2022.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. **Water Resources Research**, v. 34, n. 3, p. 505–516, 1998.

MITASOVA, H.; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, M.; IVERSON, L.R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal Geographical Information System**, v. 10, n. 5, p. 629-641, 1996.

NAEEM, S.; INGRAM, J.C.; VARGA, A.; AGARDY, T.; BARTEN, P.; BENNETT G.; BLOOMGARDEN E.; BREMER, L. L.; BURKILL, P.; CATTAN, M.; CHING, C.; COLBY, M.; COOK, D. C.; COSTANZA, R.; DECLERCK, F.; FREUND, C.; GARTNER, T.; GOLDMAN-BENNER, R.; GUNDERSON, J.; JARRETT, D.; KINZIG, A. P.; KISS, A.; KOONTZ, A.; KUMAR, P.; LASKY, J. R.; MASOZERA, M.; MEYERS, D.; MILANO, F.; NAUGHTON-TREVES, L.; NICHOLS, E.; OLANDER, L.; OLMSTED, P.; PERGE, E.; PERRINGS, C.; POLASKY, S.; POTENT, J.; PRAGER, C.; QUÉTIER, F.; REDFORD, K.; SATERSON, K.; THOUMI, G.; VARGAS, M. T.; VICKERMAN, S.; WEISSER, W.; WILKIE, D.; WUNDER, S. Get the science right when paying for nature's services: Few projects adequately address design and evaluation. **Science**, v. 347, p. 1206-1207, 2015. DOI: [10.1126/science.aaa1403](https://doi.org/10.1126/science.aaa1403).

NASCIMENTO, J. J. de S. **Análise da capacidade de uso da terra na bacia hidrográfica do Riacho Chafariz com auxílio de geotecnologias**. 2020. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, p.65, 2020.

OLIVEIRA, A. H.; NETO, G. K.; PEREIRA, S. Y. Estimation of erosion and deposition by Unit Stream Power Erosion and Deposition in a sub-basin on the Mogi Guaçu River's margins, municipality of Mogi Guaçu, SP, Brazil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 22, n. 1, p. 77-92, 2022.

PERIOTTO, N. A.; TUNDISI, J. G. Uma caracterização de serviços ecossistêmicos, direcionadores e valores de duas bacias hidrográficas no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 78, n. 3, p. 397-407, 2018. DOI: [10.1590/1519-6984.166333](https://doi.org/10.1590/1519-6984.166333).

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L. de; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. Dos; RODRIGUES, R. A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G.; RIBEIRO, J. L. O impacto de planos, políticas, práticas e tecnologias baseadas nos princípios da agricultura de conservação no controle da erosão do solo no Brasil. **Autoria**, 2020. DOI: [10.22541/au.158750264.42640167](https://doi.org/10.22541/au.158750264.42640167).

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.

SADEGHI, S. H. R.; GHOLAMI, L.; DARVISHAN, A. K.; SAEIDI, P. A review of the application of the MUSLE model worldwide. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, n. 2, p. 365-375, 2014. DOI: [10.1080/02626667.2013.866239](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239).

SANTANA, R. N. **Restauração De Precisão Para Minimizar A Perda De Solos Em Uma Bacia Hidrográfica Em Domínio De Mata Atlântica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 44p., 2023.

SANTOS, F. L. D.; SILVANO, R. A. M. Aplicabilidade, potencial e desafios dos Pagamentos por Serviços Ambientais para conservação da água no sul do Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 38, p. 481-498, 2016. DOI: [10.5380/dma.v38i0.43640](https://doi.org/10.5380/dma.v38i0.43640).

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição, Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCRUCCA, L. G. A. A Package for Genetic Algorithms in R. **Journal of Statistical Software**, v. 53, n. 4, p. 1-37, 2013. DOI: [10.18637/jss.v053.i04](https://doi.org/10.18637/jss.v053.i04).

SCHNEIDER, C. R.; ANGELO, D. H.; ANGELO, A. C.; BEHLING, A.; RÍOS, R. C.; BLUM, C. T. Espécies, práticas silviculturais e monitoramento: estratégias para restauração ecológica de áreas protegidas da Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 33, p. e74057, 2023.

SILVA, L. M. A. L. **Práticas Conservacionistas Do Solo E Pagamento Por Serviços Ambientais Em Uma Bacia Hidrográfica Em Domínio De Mata Atlântica**. 2023. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 54p., 2023.

SIMEDO, M. B. L.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS, A. L. M.; LOPES, M. C.; COSTA, R. C. A.; ZANATA, M.; PACHECO; FERNANDES, L. F. S. The Assessment of Hydrological Availability and the Payment for Ecosystem Services: A Pilot Study in a Brazilian Headwater Catchment. **Water**, v. 12, n. 10, 2020. DOI: [10.3390/w12102726](https://doi.org/10.3390/w12102726).

VAN DER WALT, S.; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The NumPy array: A structure for efficient numerical computation. **Computing in Science and Engineering**, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011. DOI: [10.1109/MCSE.2011.37](https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37).

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *In: U.S. Department of Agriculture, organizer*. Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, v. 40. p. 244-252, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting Rainfall-Erosion Losses From Cropland east of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation**. Washington DC: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1965.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. **USDA agricultural research services handbook**, v. 537, p. 285-291, 1978.

ZANETTI, S. S.; SCÁRDUA, M. D. S.; CECÍLIO, R. A. C. R. A.; ROSA, A. R. D. S. A.; AURÉLIO, M. A. C. M.; CAIADO, C. Avaliação De Modelos Digitais De Elevação Para Análise Espacial De Bacias Hidrográficas: Avaliação Modelo Digital De Terreno. **Cadernos de Geociências**, v. 15, 2022.

Contribuição de Autoria

1 Luiza Maria Affonso Lopes Silva

Engenheira Agrícola e Ambiental, MSc. em Engenharia Agrícola e Ambiental
<https://orcid.org/0000-0003-2705-1396> • luizaaffonso3@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Redação do manuscrito original; Escrita - revisão e edição

2 Rodrigo Nobre Santana

Engenheiro Agrícola e Ambiental, MSc. em Engenharia Agrícola e Ambiental
<https://orcid.org/0000-0002-0071-835X> • rodrigonobresantana@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Pesquisa; Metodologia; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Validação de dados e experimentos; Escrita - revisão e edição

3 Sady Júnior Martins da Costa de Menezes

Engenheiro Agrícola e Ambiental, Dr. em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0002-6723-7470> • sadymenezes@yahoo.com.br

Contribuição: Conceitualização; Pesquisa; Recebimento de financiamento; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita - revisão e edição

4 Getúlio Fonseca Domingues

Engenheiro Florestal, Dr. em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0001-8752-2001> • getulio.domingues@ufrn.br

Contribuição: Curadoria de dados; Pesquisa; Metodologia; Recebimento de financiamento; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita - revisão e edição

5 Carlos Antonio Alvares Soares Ribeiro

Engenheiro Agrícola, Dr. em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0003-0514-6853> • caas.ribeiro@gmail.com

Contribuição: Curadoria de dados; Pesquisa; Metodologia; Recebimento de financiamento; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita - revisão e edição

6 Alexandre Rosa dos Santos Rosa

Agrônomo, Dr. em Engenharia Agrícola

<https://orcid.org/0000-0003-2617-9451> • mundogeomatica@yahoo.com.br

Contribuição: Pesquisa; Recebimento de financiamento; Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita - revisão e edição

Como citar este artigo

SILVA, L. M. A. L.; SANTANA, R. N.; MENEZES, S. J. M. C.; DOMINGUES, G. F.; RIBEIRO, C. A. A. S.; ROSA, A. R. S. Pagamento por Serviços Ambientais e práticas conservacionistas do solo: estudo de caso em uma propriedade rural inserida na sub-bacia Hidrográfica do Rio Turvo - MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 35, e85863, p. 1-21, 2025. DOI 10.5902/1980509885863. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509885863>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.