

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

APLICAÇÃO DO MODELO SDR/INVEST PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS E VALORAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE

Paulo Henrique Costa¹; Daniel Thá²; Helder Nocko³, Diana Maria Cancelli⁴ & André Malheiros⁵

Abstract: Law No. 9,433/1997 establishes the charge for the use of water resources as an instrument to promote rational use, recognize water as an economic good, and finance part of the actions defined in basin plans. In this context, this study, based on the Estudo de Subsídio à Implementação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande (Study of Subsidies for the Implementation of Charges for the Use of Water Resources in the Rio Grande Basin), presents the modeling of sediment production and the valuation of hydrological ecosystem services generated by the implementation of natural infrastructure. The InVEST SDR model was used to simulate sediment production and retention in three land use scenarios: current, ambitious (restoration of all Permanent Preservation Areas - APPs), and plausible (restoration of part of the APPs and high-susceptibility areas). Based on the results, three environmental and economic benefits were valued: reduction in water treatment costs (R\$ 59.56 million/year), avoided dredging (R\$ 7.17 million/year), and replacement of agricultural nutrients (R\$ 63.31 million/year). The comparison between scenarios showed that forest restoration actions can reduce sediment exports by up to 35%. The results demonstrate the high environmental and economic return of natural infrastructure and may support the definition of priority areas for the allocation of revenues collected through the water use charge.

Resumo: A Lei nº 9.433/1997 estabelece a cobrança pelo uso de recursos hídricos como instrumento para promover o uso racional, reconhecer a água com um bem econômico e financiar parte das ações dos planos de bacia. Neste contexto, este trabalho, fundamentado no Estudo de Subsídio à Implementação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande, apresenta a modelagem da produção de sedimentos e a valoração dos serviços ecossistêmicos hídricos gerados pela implantação de infraestrutura natural. Utilizou-se o modelo InVEST SDR para simular a produção e retenção de sedimentos em três cenários de uso do solo: atual, ambicioso (restauração de todas as APPs) e plausível (restauração de parte das APPs e áreas predispostas). Com base nos resultados, foram valorados três benefícios ambientais e econômicos: redução nos custos de tratamento de água (R\$ 59,56 milhões/ano), dragagem evitada (R\$ 7,17 milhões/ano) e reposição de nutrientes agrícolas (R\$ 63,31 milhões/ano). A comparação entre cenários demonstrou que ações de restauração florestal podem reduzir em até 35% a exportação de sedimentos. Os resultados demonstram o elevado retorno ambiental e econômico da infraestrutura natural e podem subsidiar a definição de áreas prioritárias para aplicação dos recursos arrecadados com a cobrança.

Palavras-Chave - Modelo InVEST, valoração de serviços ambientais, gestão dos recursos hídricos

1) EnvEx Engenharia e Consultoria – paulo.costa@envexengenharia.com.br

2) Kralingen Economia Ambiental – daniel.tha@kralingen.com.br

3) EnvEx Engenharia e Consultoria – helder@envexengenharia.com.br

4) EnvEx Engenharia e Consultoria – diana.cancelli@envexengenharia.com.br

5) EnvEx Engenharia e Consultoria – andre@envexengenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização dos recursos hídricos, especialmente em regiões com intensa atividade agropecuária e elevada vulnerabilidade ambiental, como a Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHG), evidencia a necessidade de medidas eficazes de gestão, com destaque para a cobrança pelo uso de recursos hídricos. Estabelecida como um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), a cobrança visa não apenas assegurar a racionalização do uso, mas também prover recursos financeiros para a implementação das ações previstas nos planos de bacia, internalizando parte das externalidades negativas associadas à degradação dos recursos hídricos (Formiga-Johnsson et al., 2016).

Paralelamente, cresce o reconhecimento da importância da infraestrutura natural, composta por elementos como vegetação nativa, Áreas de Preservação Permanente (APP) e sistemas florestais, como componente da segurança hídrica (Brauman et al., 2007; Bennett et al., 2009). Tais estruturas oferecem serviços ecossistêmicos, como a melhoria da qualidade da água, a retenção de sedimentos, a regulação do escoamento superficial e a conservação do solo, os quais repercutem diretamente sobre os usos múltiplos da água e sobre a eficiência operacional dos sistemas de abastecimento (Postel & Thompson, 2005; Barten et al., 2008).

A valoração econômica desses serviços e a aplicação de modelos ambientais são estratégias cada vez mais utilizadas para quantificar os benefícios das ações de conservação, e a partir dessas ferramentas, é possível estimar ganhos indiretos, como a redução de custos com tratamento de água, menor necessidade de dragagens e reposição de nutrientes agrícolas do solo, reforçando o papel da infraestrutura natural como investimento de alto retorno (Guerry et al., 2015; Daily et al., 2009).

Neste contexto, o presente trabalho, fundamentado nos resultados do “Estudo de Subsídio à Implementação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande”, desenvolvido pelo Consórcio Envex-Ferma para a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), discute os ganhos ambientais e econômicos da implementação da cobrança em seis cenários de arrecadação propostos. O objetivo é evidenciar como a modelagem ambiental e a valoração de serviços ecossistêmicos podem fortalecer o papel da cobrança pelo uso da água.

O Estudo de Subsídio à Implementação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande propôs um modelo de cobrança para rios de domínio da União, alinhado ao Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Grande (PIRH-Grande). Foram simulados seis cenários com diferentes níveis de cobrança e arrecadação, projetados para um ciclo de 10 anos, com foco nas áreas mais críticas da bacia. Os cenários buscaram associar tecnicamente os objetivos da cobrança às ações do plano de bacia, sendo que os valores apresentados tiveram caráter indicativo, servindo como base técnica para posteriores discussões no âmbito do Comitê da BHG.

2. MATERIAIS MÉTODOS

2.1. Área de estudo e contexto do estudo base

A Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHG) integra a Região Hidrográfica do Paraná e é uma das mais importantes do país, tanto pela relevância econômica quanto pelo uso dos recursos hídricos, com uma demanda média de 83 m³/s (69% proveniente de rios federais). O rio Grande nasce na Serra da Mantiqueira, percorre 1.286 km e, após receber o rio Paranaíba, forma o rio Paraná. Ao longo de seu percurso, passa a ser de domínio da União a partir da confluência com o rio Aiuruoca, e, mais adiante, serve de limite natural entre os estados de Minas Gerais e São Paulo.

Ocupando uma área de 143.255 km², a BHG abrange 393 municípios, dos quais 325 estão inteiramente inseridos em seu território. Cerca de 60% da bacia está em Minas Gerais (214 municípios) e 40% em São Paulo (179 municípios). A população estimada é de aproximadamente 10 milhões de habitantes, sendo 90% residentes em áreas urbanas. Os corpos hídricos da bacia têm domínio dividido entre os estados de São Paulo (36,2%), Minas Gerais (51,4%) e a União (12,4%).

A BHG está organizada em 14 Unidades de Gestão Hídrica (UGHs) que correspondem às sub-bacias afluentes ao rio Grande. Em São Paulo, essas unidades são chamadas de Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), enquanto em Minas Gerais são conhecidas como Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), identificadas como “GDs”.

2.2. Modelo Invest

Para estimar a produção de sedimentos em diferentes cenários de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHG), foi utilizado o modelo *Sediment Delivery Ratio* (SDR) da plataforma InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), desenvolvida pelo *Natural Capital Project* da Universidade de Stanford, em parceria com a Plataforma de Fundos de Água da América Latina. O SDR permite calcular a geração, retenção e entrega de sedimentos na paisagem e em corpos hídricos, com base em dados espaciais.

O modelo aplica a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) para estimar a taxa anual de erosão em cada pixel da área de estudo e, em seguida, calcula a fração desse material que atinge os cursos d'água, com base em fatores como conectividade hidrológica, declividade, cobertura do solo e práticas de manejo (Borselli *et al.*, 2008). Os resultados são consolidados em indicadores de carga total de sedimentos exportados para os rios e retidos na paisagem. A escolha do modelo SDR se justifica por sua ampla aplicação em análises hidrossedimentológicas (Feltran-Barbieri *et al.*, 2021; Guimarães e Thá, 2018; Silva, Poliseli e Vieira, 2016).

2.3. Dados de entrada

Para realização da modelagem, foram utilizados os seguintes dados de entrada:

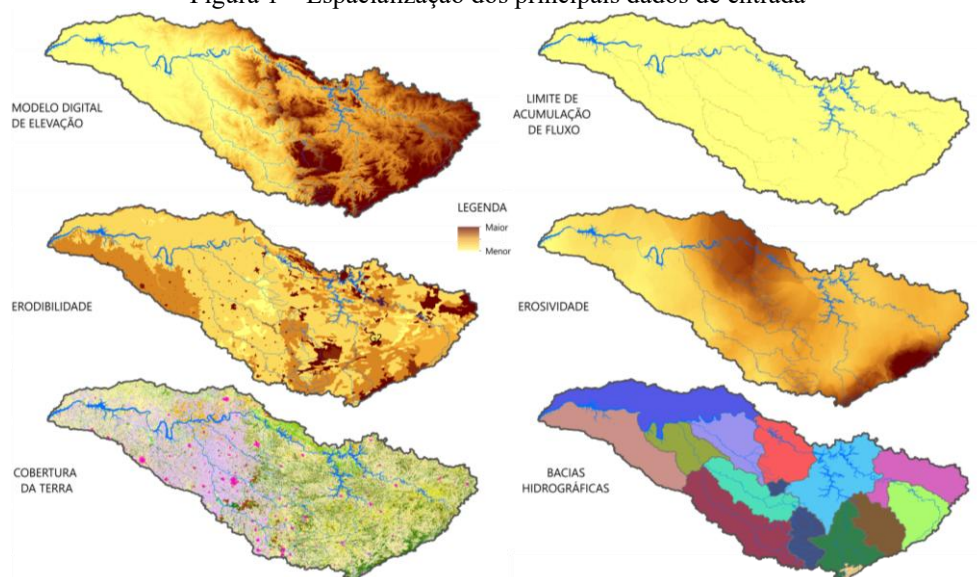
- **Modelo Digital de Elevação (MDE):** obtido pela plataforma *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS), o MDE utilizado, foi o da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de 30 metros de resolução espacial.
- **Índice de Erosividade da Chuva (Fator R):** a partir do mapeamento da precipitação existente na base cartográfica do PIRH-Grande, fornecida pela ANA, os índices de pluviometria foram multiplicados pela equação proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), obtendo os Fatores R;
- **Erodibilidade do Solo (Fator K):** a partir do mapeamento de solos, existente na base cartográfica do PIRH-Grande, fornecida pela ANA, as classes de solo receberam fatores K, encontrados nas publicações de Lima *et. al* (1990); Moraes e Sales (2017) Conceição (2014) Borges *et. al* (2003) Silva e Alvares (2005).
- **Cobertura da Terra:** obtido pela plataforma MapBiomas, o raster com 30 metros de resolução espacial, apresenta a espacialização da cobertura da terra em toda bacia. Para cada uma das 19 classes existentes na bacia, foram atribuídos índices de proteção (*usle_c*), perda (*usle_p*) e capacidade de retenção do solo (*sedret.eff*) obtidos nas publicações de Silva, Poliseli e Vieira (2016), Azevedo (2012) Panichi (1994) e Conceição (2014).
- **Limite de Acumulação de Fluxo:** com base no MDE supracitado, esse parâmetro foi calculado por técnicas de geoprocessamento (ferramenta *Flow Accumulation*) do software

ArcView 10.5, resultado em um valor de 356.005. Como forma de calibrar o valor resultante, o SDR traz, dentre os seus resultados intermediários, o fluxo acumulado gerado, o qual foi comparado com a hidrografia principal, revelando-se satisfatoriamente condizente;

- **Bacias Hidrográficas:** a partir do mapeamento das UGHs existente na base cartográfica do PIRH-Grande, fornecida pela ANA, cada bacia recebeu uma codificação correspondente para ser utilizada como recorte de análise da modelagem. É com base neste plano de informação que o SDR monta os quantitativos resultantes da modelagem;
- **Áreas de Preservação Permanente de corpos hídricos e nascentes:** mapeamento da Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável (FBDS), por meio da classificação supervisionada de imagens RapidEye, ano base 2013, na escala de visualização de 1:10.000, para os 393 municípios situados na Bacia do Rio Grande.
- **Outros parâmetros:** os demais parâmetros (índice de conectividade hidrológica; taxa de entrega de sedimentos; e fração das partículas da camada superficial do solo mais finas do que a areia grossa) são, reconhecidamente, de difícil obtenção. Por isso, a documentação do SDR, sugere como *default*, os respectivos valores: 2; 0,5; e 0,8.

A Figura 1 apresenta a espacialização ilustrativa dos dados de entrada do modelo, os quais foram obtidos ou convertidos em formato matricial, de resolução espacial de 30 metros, com exceção do *shapefile* “Bacias Hidrográficas”, de formato obrigatoriamente vetorial. Não foram aplicadas técnicas de calibração do modelo, haja vista que o intuito do trabalho foi o de comparar o comportamento das diferentes UGHs na produção de sedimentos.

Figura 1 – Espacialização dos principais dados de entrada



2.4. Cenários de uso do solo

A partir do cenário atual de uso e cobertura da terra, obtido a partir do mapeamento do MapBiomas, foram elaborados dois cenários prospectivos para análise comparativa da produção de sedimentos na BHG: um cenário denominado ambicioso e outro plausível.

O cenário ambicioso considera a restauração integral das APPs associadas a cursos d'água, incluindo matas ciliares e entornos de nascentes, mediante o plantio de espécies arbóreas nativas. Embora classificado como ambicioso frente à realidade encontrada, esse cenário está alinhado às exigências legais do Código Florestal (Lei nº 12.651/2012). A implementação dessa estratégia demandaria a restauração de aproximadamente 819.166 hectares, equivalentes a 5,70% da área total da BHG.

O cenário plausível, por sua vez, pressupõe a restauração apenas das APPs de nascentes e dos cursos d'água de maior hierarquia fluvial, definidos como aqueles cuja legislação exige faixas mínimas de proteção de 50 metros. Esse cenário também incorpora a recuperação das áreas atualmente ocupadas por pastagens e identificadas no cenário atual como *hotspots* de produção de sedimentos (superiores a 2,5 t/ha/ano), com áreas mínimas de 900 m². Ao todo, a área prevista para restauração nesse cenário totaliza 303.764 hectares, correspondentes a 2,10% da BHG.

2.5. Valoração econômica

Para cada um dos seis cenários de cobrança inicialmente propostos no Estudo de Subsídio à Implementação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia do Rio Grande, foi adotada uma quantidade referencial de hectares de APP a serem restauradas, mantendo-se a proporcionalidade por UGH. Com base nesse referencial, foi possível subsidiar a valoração dos seguintes benefícios ambientais e econômicos associados a infraestrutura natural: melhor qualidade da água, menor assoreamento de massas de água e menor perda de solo agrícola.

A valoração dos benefícios associados à redução do aporte de sedimentos nos corpos d'água foi realizada com base na estimativa de redução dos custos de tratamento da água. A principal hipótese é que a menor carga de sedimentos implica menores níveis de turbidez, reduzindo a necessidade de insumos químicos (como coagulantes) e o consumo de energia elétrica no processo de potabilização. A relação entre qualidade da água bruta e custos de tratamento é amplamente estudada, destacando-se a revisão sistemática de Price e Heberling (2018), que identificaram uma elasticidade média de -0,23% a cada 1% de redução na carga de sedimentos. No presente estudo, a comparação entre os cenários simulados no modelo permitiu quantificar a redução percentual na exportação de sedimentos. Essa redução foi aplicada sobre os custos totais de tratamento de água, estimados com base em dois indicadores do SNIS: o custo médio por metro cúbico de água faturado (IN003) e o volume anual consumido (AG010) nos municípios da bacia.

A valoração do benefício gerado pela redução do assoreamento foi realizada com base na metodologia de custos evitados, utilizando como *proxy* o custo de dragagem do material sedimentado nos corpos hídricos. Para estimar esse valor, foi adotado o custo de dragagem de R\$ 710,52 por metro cúbico, calculado a partir dos dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT para os estados de Minas Gerais e São Paulo, ponderado conforme a área de abrangência da bacia hidrográfica do rio Grande. Assumiu-se, com base em Sousa Junior (2011), uma taxa média de assoreamento de 50% dos sedimentos exportados para os corpos d'água. A conversão dos sedimentos (t/ano) em volume (m³) foi realizada considerando que 1 metro cúbico equivale a 1,5 toneladas de sedimentos, também segundo Sousa Junior (2011).

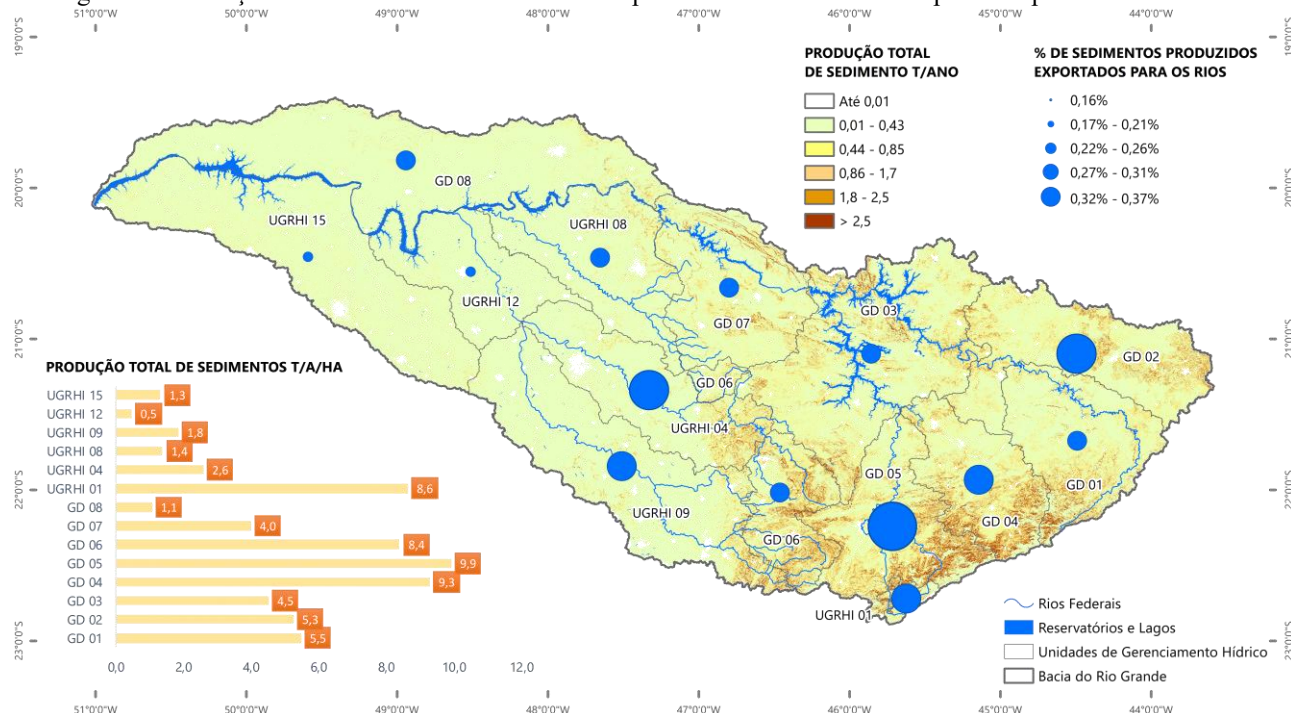
A valoração do benefício gerado pela redução da perda de solo agrícola decorrente da retenção de sedimentos na paisagem foi realizada por meio da *proxy* do custo evitado de reposição de nutrientes. A lógica adotada considera que a erosão retira nutrientes essenciais do solo (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio), cuja reposição impõe custos ao setor agrícola. Os dados de referência foram obtidos no estudo de Pereira, Tôsto e Romeiro (2019), que estimaram, no município de Araras (SP), a quantidade de fertilizantes necessária para repor os nutrientes perdidos por erosão laminar em diferentes grupos de culturas: cana-de-açúcar, citros, culturas anuais (soja e milho) e café. Os custos de reposição foram calculados com base na aplicação de insumos como sulfato de amônia, superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário dolomítico. Assim, estimou-se o custo de reposição de nutrientes no cenário atual e aplicou-se a redução percentual proporcionada pelo cenário de restauração florestal (ambicioso).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção de sedimentos nos cenários de uso do solo

A partir dos resultados do modelo foram obtidas estimativas da produção de sedimentos para toda a BHG e suas UGHs nos três cenários de uso do solo concebidos. No cenário atual, a produção média de sedimentos exportados para os corpos hídricos da BHG foi de 0,009 t/ha/ano, enquanto a deposição na paisagem alcançou 3,724 t/ha/ano. Entre as UGHs, a Figura 2 mostra que a GD-04 e a GD-05 apresentaram os maiores índices, com destaque para a GD-05, que responde por cerca de 25% da carga total de sedimentos exportados para os cursos d'água da bacia.

Figura 2 – Produção de sedimentos no cenário atual e percentual de sedimentos exportados para os rios da BHG



No cenário ambicioso, que considera a restauração integral das APPs de cursos hídricos atualmente ocupadas por tipologias não florestais, as taxas médias foram reduzidas para 0,006 t/ha/ano de sedimentos exportados e 3,124 t/ha/ano depositados na paisagem. Esse cenário resultaria na redução de 47.350 t/ano de sedimentos exportados e 8.631.726 t/ano de sedimentos retidos na bacia. No cenário plausível, que prevê a restauração de APPs com largura mínima de 50 metros atualmente degradadas e de áreas de alta suscetibilidade à produção de sedimentos ocupadas por pastagens, as médias simuladas foram de 0,007 t/ha/ano de sedimentos exportados e 3,346 t/ha/ano de sedimentos depositados. Esse cenário resultaria na mitigação de 32.071 t/ano de sedimentos exportados e 5.437.912 t/ano de sedimentos depositados na paisagem.

Conforme mostra os dados dispostos na Tabela 1, a comparação entre os cenários demonstra que a adoção do cenário ambicioso permitiria reduzir em 35% a carga de sedimentos exportada para os rios e em 16% a deposição de sedimentos na paisagem, em relação ao cenário atual. Já o cenário plausível apresenta reduções de 24% e 10%, respectivamente, o que demonstra o papel de seleção de intervenções prioritárias. Esses resultados reforçam a importância da restauração de APPs como estratégia de infraestrutura natural para o controle da erosão, conservação do solo e promoção da segurança hídrica, com destaque para ações priorizadas nas UGHs mais impactantes, como a GD-05.

Tabela 1 – Quantificação da produção de sedimentos exportados e depositados entre os cenários

UGHs	Exportados para rios				Depositados na paisagem			
	Cenário Atual		Ambicioso / Atual	Plausível /Atual	Cenário Atual		Ambicioso / Atual	Plausível /Atual
	t/ano	t/ano/ha			t/ano	t/ano/ha		
GD 01	9.196	0,010	-32,1%	-18,4%	4.854.042	5,469	-19,2%	-8,7%
GD 02	15.829	0,015	-37,8%	-20,3%	4.673.333	4,393	-16,1%	-3,7%
GD 03	15.182	0,009	-21,5%	-10,3%	8.139.503	4,885	-12,8%	-5,6%
GD 04	16.662	0,024	-36,5%	-30,5%	6.452.002	9,269	-17,1%	-17,3%
GD 05	32.643	0,037	-48,3%	-39,2%	9.359.183	10,494	-18,3%	-19,1%
GD 06	9.964	0,017	-30,9%	-24,2%	1.804.166	3,014	-17,1%	-11,9%
GD 07	7.636	0,008	-23,9%	-18,4%	3.938.421	3,993	-16,1%	-14,1%
GD 08	3.876	0,002	-16,7%	-7,7%	1.758.697	0,939	-7,3%	-1,6%
UGRHI 01	1.330	0,020	-47,5%	-36,3%	23.074	0,341	-44,9%	-34,2%
UGRHI 04	7.204	0,008	-44,7%	-19,4%	4.521.155	5,049	-18,0%	-7,3%
UGRHI 08	2.708	0,003	-19,0%	-7,2%	1.432.282	1,556	-10,6%	-2,0%
UGRHI 09	6.598	0,004	-42,6%	-20,8%	3.941.937	2,614	-21,3%	-7,3%
UGRHI 12	537	0,001	-14,0%	-5,5%	306.713	0,425	-5,9%	-1,5%
UGRHI 15	3.390	0,002	-14,6%	-3,6%	2.339.361	1,46	-8,0%	-1,3%
BHG	132.757	0,009	-35,7%	-24,2%	53.543.870	3,724	-16,1%	-10,2%

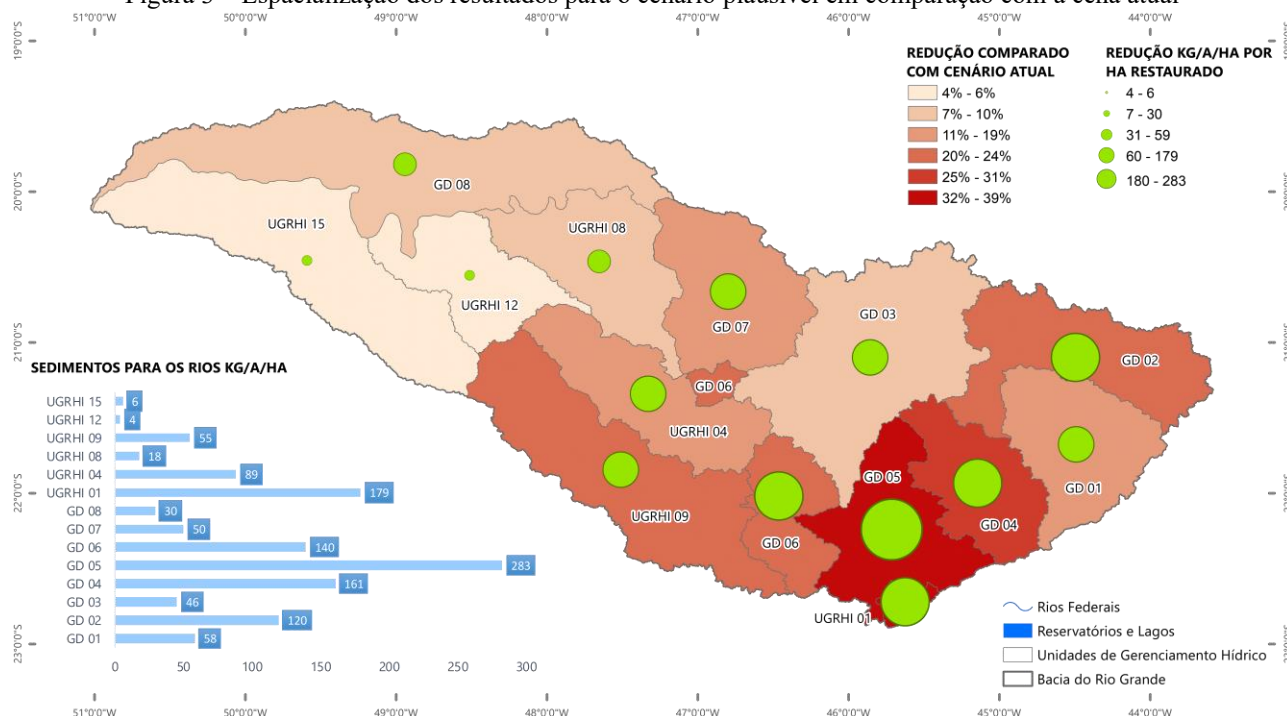
Outra métrica comparativa é a eficiência da restauração florestal, utilizada para representar o quanto cada hectare reflorestado é capaz de contribuir para a redução de sedimento. A Tabela 2 mostra que a restauração de um hectare na BHG é capaz de reduzir 0,058 t/a de sedimentos depositados nos rios no cenário ambicioso e 0,106 t/a no cenário plausível. Em relação aos sedimentos depositados na paisagem, a diferença entre os cenários é ligeiramente menor, onde cada hectare restaurado é capaz de reduzir 10,537 t/a no cenário ambicioso e 17,902 t/a no cenário plausível.

Tabela 2 – Quantidade de áreas para restauração e eficiência por ha reflorestado entre os cenários

UGHs	Restauração (ha)		Expor. p/ rios (t/a/ha)		Depo. na paisagem (t/a/ha)	
	Ambicioso	Plausível	Ambicioso	Plausível	Ambicioso	Plausível
GD 01	90.513	28.890,40	-0,03	-0,06	-10,29	-14,65
GD 02	88.038	26.918,60	-0,07	-0,12	-8,57	-6,46
GD 03	117.391	34.200,40	-0,03	-0,05	-8,87	-13,23
GD 04	51.378	31.589,80	-0,12	-0,16	-21,42	-35,25
GD 05	65.787	45.302,20	-0,24	-0,28	-26,02	-39,52
GD 06	42.628	17.278,40	-0,07	-0,14	-7,25	-12,37
GD 07	74.985	27.908,70	-0,02	-0,05	-8,46	-19,90
GD 08	51.746	10.064,00	-0,01	-0,03	-2,49	-2,76
UGRHI 01	5.303	2.690,30	-0,12	-0,18	-1,96	-2,93
UGRHI 04	49.485	15.739,80	-0,07	-0,09	-16,47	-20,91
UGRHI 08	28.788	10.874,40	-0,02	-0,02	-5,29	-2,63
UGRHI 09	69.195	24.948,60	-0,04	-0,06	-12,11	-11,54
UGRHI 12	17.254	6.967,70	0,00	0,00	-1,06	-0,65
UGRHI 15	66.675	20.391,10	-0,01	-0,01	-2,81	-1,46
BHG	819.166	303.764,30	-0,06	-0,11	-10,54	-17,90

Considerando o quantitativo de áreas necessárias para restauração nos cenários e a eficiência da restauração florestal, avalia-se que o cenário plausível é mais viável quando comparado ao ambicioso. O mapa da Figura 3 sintetiza o impacto desse cenário em relação à cena atual.

Figura 3 – Espacialização dos resultados para o cenário plausível em comparação com a cena atual



3.2. Valoração dos benefícios ambientais nos cenários de cobrança

Os resultados da modelagem permitiram a valoração de três benefícios ambientais e econômicos associados à implantação de infraestrutura natural na BHG: melhoria da qualidade da água, redução do assoreamento de corpos hídricos e diminuição da perda de solo agrícola. No caso da melhoria da qualidade da água, estima-se que o custo total anual de tratamento na bacia seja de aproximadamente R\$ 1,64 bilhão. A implementação de ações de infraestrutura natural previstas no cenário plausível resultaria em uma redução de 5,25% nesses custos, o que corresponde a um benefício econômico anual da ordem de R\$ 59,56 milhões. Embora a relação entre sedimentos e custos de tratamento não seja linear em escala local, os valores são representativos para a escala da bacia e devem ser interpretados como aproximações da ordem de grandeza dos benefícios esperados, sendo a economia de custos uma proxy para a valoração dos serviços ecossistêmicos.

Com relação à redução do assoreamento, a aplicação da metodologia no cenário de maior esforço de restauração indicou um benefício econômico anual estimado em R\$ 7,17 milhões, decorrente da dragagem evitada. Esse valor expressa o serviço ecossistêmico prestado pela infraestrutura natural ao minimizar a deposição de sedimentos em corpos hídricos, mesmo considerando que parte da dragagem representada não seja necessariamente realizada na prática.

Quanto à diminuição da perda de solo, o cenário ambicioso de restauração resultou em um benefício econômico anual de R\$ 63,31 milhões, correspondente aos custos evitados com a perda de produtividade decorrente da erosão. Esse benefício evidencia a relevância da retenção de sedimentos como serviço ecossistêmico, frequentemente subdimensionado nas análises econômicas tradicionais.

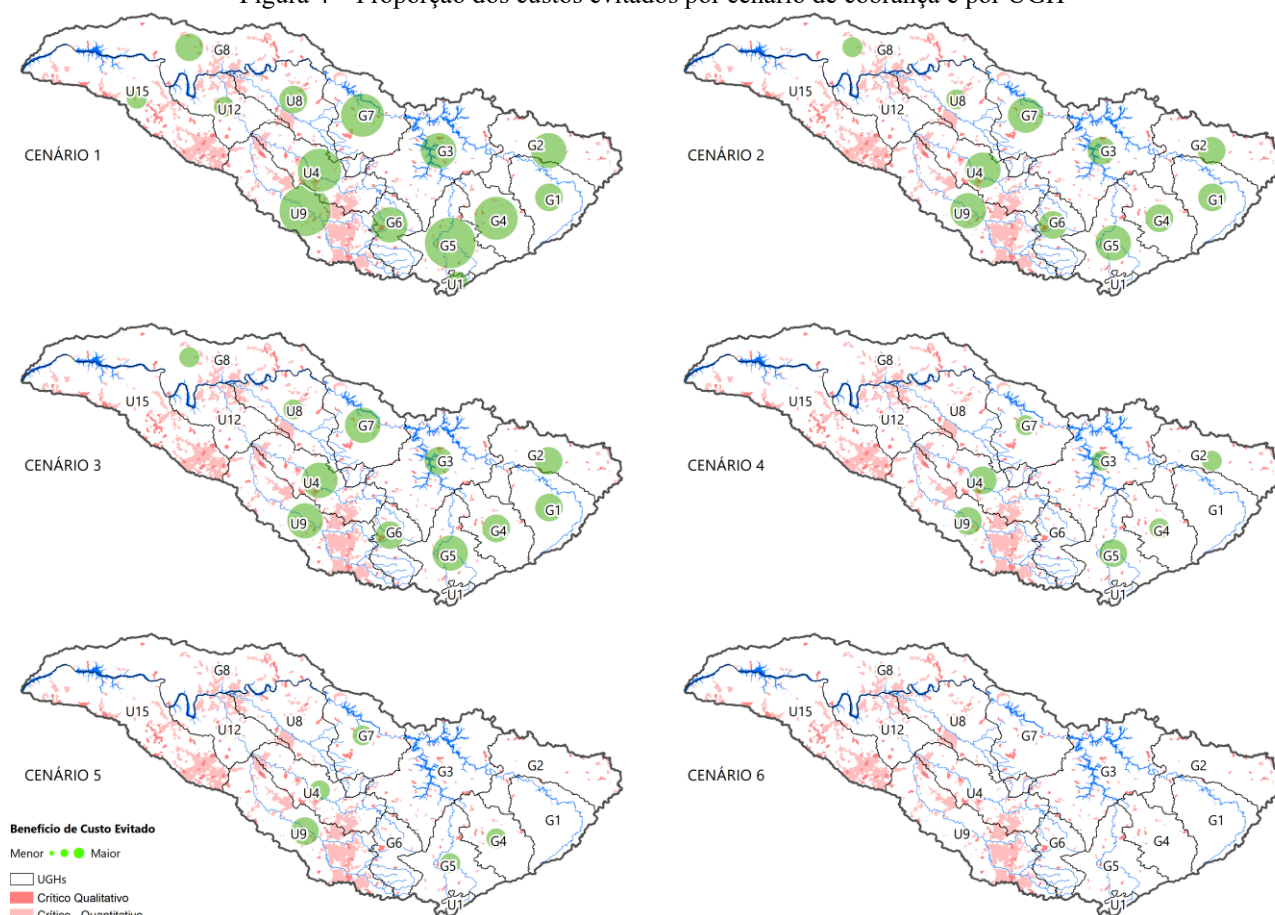
Esses três benefícios decorrem da maior capacidade de retenção de sedimentos via restauração de áreas prioritárias. A Tabela 3 apresenta os valores consolidados e a Figura 4 espacializa as proporções, subsidiando a identificação de UGHs que melhor respondem aos investimentos.

Tabela 3 – Valoração dos benefícios econômicos (R\$ x 1.000,00) por cenário de cobrança

Custos evitados	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6*
Para o tratamento de água	59.559	28.418	28.418	11.688	8.552	0
Para a dragagem de sedimentos	7.172	3.422	3.422	1.407	1.030	0
De reposição de nutrientes	63.308	30.207	30.207	12.423	9.091	0
Total	130.039	62.047	62.047	25.518	18.673	0

*Cenário de cobrança sem recursos disponíveis para orçamentos associados, como o da infraestrutura natural.

Figura 4 – Proporção dos custos evitados por cenário de cobrança e por UGH



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das limitações técnicas do SDR como a não consideração de alguns tipos de erosões específicas e a opção dos autores em não calibrar o modelo, avalia-se que a modelagem permitiu comparar a produção de sedimentos nos diferentes cenários de uso do solo, resultando em valores indicativos que ajudam a identificar áreas prioritárias para investimentos na BHG. As unidades UGRHI-01, GD-05, GD-04 e UGRHI-09 foram identificadas como as mais sensíveis às mudanças no uso do solo, recomendando a preservação da vegetação florestal, especialmente em áreas com características favoráveis à erosão. Além disso, as unidades GD-05, UGRHI-01, GD-04, GD-06 e GD-07 apresentam maior potencial de resposta a investimentos em regeneração florestal, com destaque para GD-05, onde o plantio tende a reduzir fortemente a exportação de sedimentos nos rios.

A valoração dos benefícios ambientais e econômicos da infraestrutura natural oferece uma base técnica para orientar investimentos estratégicos em restauração, destacando o papel estratégico

dos serviços ecossistêmicos na melhoria da qualidade da água, redução do assoreamento e proteção do solo agrícola. Os resultados fortalecem a comprovação dos benefícios difusos da correta aplicação dos recursos arrecadados pela cobrança, reforçando a importância da integração entre instrumentos técnicos e financeiros para a gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Estudo de subsídio à cobrança pelo uso de recursos hídricos da Bacia do Rio Grande*. Relatório Final Consolidado. Brasília. 2022. Disponível em: <<https://shre.ink/eTpt>> Acesso em 20 mai. 2025
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Plano Integrado de Recursos Hídricos do Rio Grande*. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2014.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. *Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil 2013-2017*. IBGE, Contas Nacionais n. 72 ISSN 1415-9813, Brasília, 2020.
- BENNETT, E. M. et al. “Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*”, v. 12, n. 12, p. 1394–1404, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>
- BORSSELLI, L. et al. A new method for the assessment of soil erosion risk: The sediment connectivity index. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 12, p. 1921–1930, 2008. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1921-2008>
- BRAUMAN, K. A. et al. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 32, p. 67–98, 2007.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. *Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jan. 1997.
- BORSELLI, L.; BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. “Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment numerical assessment”. *Catena*, v. 75, n. 3, p. 268–277, 2008. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>>.
- DAILY, G. C. et al. “Ecosystem services in decision making: time to deliver”. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 7, n. 1, p. 21–28, 2009.
- FELTRAN-BARBIERI, R., S. OZMENT, P. HAMEL, E. GRAY, H. MANSUR, T. VALENTE, J. RIBEIRO, and M. FORMIGA-JOHNSON, R. M.; TOLEDO, G. S. de; SILVA, A. P. da. “Cobrança pelo uso da água: objetivos e desafios institucionais na política de recursos hídricos”. *Revista Ambiente & Sociedade*, v. 19, n. 2, p. 143–166, 2016.
- GUERRY, A. D. et al. “Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, n. 24, p. 7348–7355, 2015.
- MATSUMOTO. “*Infraestrutura Natural para Água no Sistema Guandu, Rio de Janeiro*”. [Natural Infrastructure for Water in Guandu System, Rio de Janeiro]. São Paulo: World Resources Institute-Brasil, 2018.
- GUIMARÃES, J.L.B.; THÁ, D; SAAD, S.Y. “*Soluções Baseadas na Natureza para aumento da resiliência hídrica: quantificação e valoração dos benefícios da infraestrutura natural no município de São Bento do Sul (SC)*”. Curitiba-PR: Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza, 2018
- Lombardi Neto, F.; Bertoni, J. *Erodibilidade de solos paulistas*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1975.
- PEREIRA, L. C.; TÔSTO, S. G.; ROMEIRO, A. R. (2019). *Uso das terras - Perdas de solo por erosão e valoração econômica (pp 929:943)*. Terra - Mudanças Climáticas e Biodiversidade. ISBN: 978-85-68066-83-6.
- PRICE, J. I.; HEBERLING, M. T. *The Effects of Source Water Quality on Drinking Water Treatment Costs: A Review and Synthesis of Empirical Literature*. *Ecological Economics*. 2018. 195–209.
- SILVA, A. M. da; ALVARES, C. A. “*Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo*”. 2005. Laboratório de Ecologia Isotópica, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.
- SILVA, R. B. da; POLISELI, P. C.; VIEIRA, E. “*Avaliação da perda de solos na Microbacia hidrográfica Lajeado dos Frágosos – Município de Concórdia – SC. 2016*”. (Tese de Conclusão de Cursos). Universidade Federal de Santa Catarina, SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/174377>>. Acesso em mai. De 2025.
- SOUSA JÚNIOR, W.C. “*Análise econômica da relação entre uso do solo e custos de tratamento de água no Estado de São Paulo*”. SMA-SP, 2011.
- TEIXEIRA J. C.; GUILHERMINO, R. L. “*Análise da associação entre saneamento e saúde nos estados brasileiros, empregando dados secundários do banco de dados Indicadores e Dados Básicos para a Saúde – IDB 2003*”. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental* n. 11:277-82, 2006.