

VALORAÇÃO ECONÔMICA DE DANO AMBIENTAL AOS RECURSOS HÍDRICOS OCASIONADO POR CONTAMINAÇÃO COM GLIFOSATO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.VIII-006>

Alexandra Fatima Saraiva Soares (*), Antônio Olinto Vieira Machado

* Instituto de Educação Continuada da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (IEC-PUC/MINAS); Ministério Público de Minas Gerais (MPMG). Asaraiva.soares@gmail.com

RESUMO

O glifosato é um herbicida amplamente utilizado, com alta solubilidade em água, capaz de contaminar cursos hídricos e causar impactos à biota aquática e à qualidade ambiental. Dessa forma a introdução dessa substância no ambiente ocasiona degradação dos atributos físicos, químicos e ecológicos do recurso hídrico e requer a responsabilização e reparação pelo princípio do poluidor-pagador. Nesse sentido, este estudo objetivou quantificar e valorar economicamente o dano ambiental ocasionado pelo lançamento de 100 L de glifosato em curso de água inserido na sub-bacia do Rio Formiga (MG), por meio do cálculo do Valor Econômico do Recurso Ambiental (VERA), considerando o Valor de Uso Indireto (VUI) dos recursos hídricos afetados e utilizando a metodologia Emergética. A análise envolveu a determinação da massa de água necessária para diluição do poluente até atingir o limite legalmente permitido para a substância no rio que está enquadrado na Classe 2. Calculou-se a energia potencial associada a esse processo de diluição e procedeu-se a conversão do resultado em energia em valores monetários. O dano ambiental estimado correspondeu a R\$ 133.713,88.

PALAVRAS-CHAVE: Valoração ambiental, Dano ambiental, Poluição hídrica. Glifosato. Emergia.

INTRODUÇÃO

A contaminação de recursos hídricos por agrotóxicos é um problema crescente, especialmente nas regiões agrícolas e íngremes de Minas Gerais, com impactos negativos à saúde ambiental e humana. O glifosato, herbicida de amplo espectro, apresenta alta solubilidade em água e mobilidade em solos arenosos ou saturados. Esses aspectos favorecem a contaminação de rios e aquíferos. Estudos indicam impactos crônicos sobre organismos não-alvo, incluindo efeitos genotóxicos, hormonais e imunológicos, tanto em espécies aquáticas quanto terrestres (IUPAC, 2025).

A valoração econômica de danos ambientais é uma ferramenta essencial para estimar os custos associados à degradação de recursos naturais e subsidiar a aplicação do princípio do poluidor-pagador. Entre as metodologias existentes, a abordagem emergética permite quantificar o valor dos serviços ecossistêmicos afetados, considerando a energia solar incorporada (em joules solares, SeJ) e convertendo-a em valor monetário, fornecendo uma estimativa objetiva do valor do dano ambiental (MOTTA, 1998; MINAS GERAIS, 2020).

A NBR 14.653-6:2008 (versão corrigida) da ABNT trata de avaliação de recursos naturais e ambientais. De acordo com a norma, não é possível estabelecer, a princípio, a prevalência de um método de valoração de danos ambientais em relação ao outro. Essa norma técnica, entre alguns conceitos e referências, estabelece que o valor econômico do recurso ambiental (VERA) é igual ao valor de uso (VU), mais o valor de existência (VE) $\rightarrow \text{VERA} = \text{VU} + \text{VE}$. O VERA pode ser entendido como o valor de uso direto (VUD), acrescido do valor de uso indireto (VUI), do valor de opção (VO) e do valor de existência (VE).

Há diversos métodos de valoração que objetivam obter as parcelas do valor econômico do recurso ambiental. Neste trabalho, aplicou-se a metodologia emergética para estimar o Valor de Uso Indireto (VUI) da água superficial afetada pela introdução da substância glifosato no Rio Formiga.

OBJETIVO

O objetivo deste artigo é quantificar e valorar economicamente o dano ambiental causado pela introdução de 100 litros de glifosato nos recursos hídricos na sub-bacia do Rio Formiga, aplicando metodologia técnico-científica normatizada – Valor Econômico do Recurso Ambiental (VERA) e Emergia.

METODOLOGIA UTILIZADA

Área de Estudo – Trechos de cursos de água afetados pelo agrotóxico

O trabalho foi desenvolvido na sub-bacia do Rio Formiga, região Centro-Oeste de Minas Gerais, situada em Formiga/MG. O Rio Formiga é um dos principais cursos de água que atravessam a área urbana no município e é formado pela junção de córregos e ribeirões, incluindo o Córrego Manuel do Reis, o Ribeirão Morro das Pedras e o Córrego da Barra Mansa.

Caracterização do glifosato

As propriedades físico-químicas gerais, relacionadas ao destino ambiental do glifosato, foram obtidas do *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2025), da Ficha de Segurança do Produto Químico (FISPQ), bem como da literatura técnica pertinente.

Também foram levantados no site da IUPAC (2025) e na literatura técnica especializada (SARAIVA SOARES, 2015) índices de GUS e GOSS para a substância avaliada. Tratam-se de indicadores geral de perigo, calculado a partir das propriedades físico-químicas da substância. Portanto, não contemplam fatores específicos, como condições ambientais locais, dosagens e momento de aplicação em campo ou a formulação utilizada, sendo considerados estimativas de risco ambiental e não substituem a avaliação de risco. No entanto, esses índices permitem estimar o potencial de a substância contaminar as águas superficiais (GOSS) e subterrâneas (GUS).

Por fim, foram obtidas informações acerca de potenciais riscos à saúde humana relacionados ao glifosato (IUPAC, 2025).

Valoração Econômica do Dano Ambiental

A valoração econômica ou financeira de dano ambiental consiste, conforme Art. 3º, XXV da IN IBAMA Nº 20/2024, na aplicação de critérios técnicos e econômicos para estimar valor mínimo do dano a atributos ambientais que devem ser objeto da reparação por dano ambiental, com base em bens ou serviços ecossistêmicos de utilidade econômica potencial ou real (IBAMA, 2024).

Para os cálculos, foi considerada a diluição da substância glifosato (CAS RN 1071-83-6) na água até atingir a concentração máxima legalmente permitida para o enquadramento (Classe 2).

A metodologia para a valoração dos danos utilizou a formulação do VERA, incluída pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, na Norma Brasileira – NBR 14653:2001 – Parte 6, que versa sobre métodos e procedimentos para avaliação de recursos naturais, os quais são baseados em metodologias para a aferição da disposição de consumidores a pagar por serviços ecológicos e funções ambientais (ABNT, 2009).

Segundo Serôa da Motta (1998), a tarefa de valorar economicamente um recurso ambiental consiste em determinar quanto melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas, devido a mudanças na quantidade de bens e serviços ambientais, seja na apropriação por uso ou não. Assim, de acordo com esse autor, o valor econômico de um recurso ambiental (VERA) compreende a soma dos valores de uso e de não uso, podendo ser expresso da seguinte forma, conforme **Equação 1**:

$$\text{VERA} = \text{VUD} + \text{VUI} + \text{VO} + \text{VE}$$

Equação 1

Onde:

VUD = Valor de Uso Direto;

VUI = Valor de Uso Indireto;

VO = Valor de Opção;

VE = Valor de Existência ou Valor de Não Uso.

O Decreto Nº 4339, de 22 de agosto de 2002, que institui princípios e diretrizes para a implantação da Política Nacional da Biodiversidade, também estabelece em seu Anexo (Inciso XIV) que o valor da biodiversidade inclui valor de uso direto e indireto, de opção de uso futuro e, ainda, valor intrínseco, incluindo os valores ecológico, genético, social, econômico, científico, educacional, cultural, recreativo e estético. Nesse contexto, foi utilizado no cálculo da valoração apenas o Valor de Uso Indireto – VUI dos recursos hídricos afetados.

Cálculo do VUI

O Valor de Uso Indireto – VUI é definido como o valor atribuído a um recurso ambiental em virtude de suas funções ecossistêmicas. Para a estimativa do VUI foi utilizado o conceito de Emergia, que corresponde à energia solar que foi previamente requerida, de forma direta ou indireta, para produzir um certo produto ou serviço (ODUM, 1996).

Dessa forma, o valor monetário dos serviços ambientais, afetados pelo lançamento do herbicida glifosato no córrego Água Vermelha, que deságua no Rio Formiga, foi quantificado pela metodologia, denominada no meio científico, de metodologia Emergética ou Ecoenergética (ODUM, 1996; PILLET, 1997).

Esta metodologia consiste em avaliar o fluxo de matéria e energia, permitindo analisar o nível biofísico de estresse ambiental a partir de vetores de produção e demanda por ativos e serviços ecossistêmicos (MOTA, 2010).

O método utiliza a energia solar incorporada (Emergia) aos recursos ambientais para expressar a contribuição da natureza na produção de insumos, matérias-primas, produtos e serviços. Dessa forma, a contabilidade ambiental é realizada utilizando o Joule de energia solar (SeJ), que corresponde à unidade de medida da Emergia (ODUM, 1996), permitindo, ao contrário do que ocorre na economia convencional, atribuir um valor real aos recursos naturais pelo bem-estar que eles proporcionam, em virtude de suas funções ecossistêmicas e serviços ambientais realizados.

Assim, neste trabalho, para a determinação do Valor de Uso Indireto – VUI, foi enfatizado e analisado o serviço ambiental associado ao recurso natural, água superficial, contaminado pelo glifosato.

Dessa forma, foi determinada a massa de água, em kg, necessária para a diluição do parâmetro até o padrão de referência, estabelecido para a Classe 2, na Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH nº 8, de 21 de novembro de 2022 e Resolução CONAMA Nº 357/2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

Calculou-se, então, a energia potencial (serviço ecossistêmico), em Joule (J)/dia, associada ao escoamento gravitacional da massa de água durante a diluição do poluente (glifosato), a qual foi convertida, posteriormente, em uma medida emergética equivalente (SeJ/dia), por meio do fator de conversão de energia em emergia (energia solar incorporada), denominado Transformidade Solar ou Índice de Transformidade, expresso em emergia por Joule (SeJ/J).

Os índices de transformidade são calculados por pesquisadores em todo o mundo (ODUM, 1996), sendo amplamente divulgados em periódicos científicos e endereços eletrônicos especializados (ORTEGA, 2000).

Finalmente, a emergia do serviço ambiental associado à massa de água foi obtida, em termos monetários (dólar), utilizando o índice de equivalência emergia/dólar ($3,0 \times 10^{12}$ SeJ/US\$), determinado para o Brasil por Ortega (2000). Esse índice permite comparar a emergia do serviço afetado à emergia do dinheiro que circula no país em determinado ano, possibilitando a conversão dos valores de energia solar em dinheiro. Posteriormente, para a determinação dos valores em Reais (R\$), foi utilizado o câmbio atual.

Utilizou-se no cálculo da valoração o VUI dos recursos hídricos afetados, determinado pelo serviço ambiental associado à água superficial poluída – metodologia Emergética. Assim, a avaliação dos serviços ecossistêmicos afetados foi realizada a partir da carga de contaminante lançada, da avaliação do trecho dos rios afetados pelo contaminante e da quantidade da água necessária para a diluição da substância.

Diante do exposto, a emergia dos serviços ecossistêmicos afetados (capacidade de diluição do corpo d'água) e seu respectivo valor monetário foram calculados por meio dos seguintes passos:

- i. conversão dos serviços ecossistêmicos previamente calculados em uma medida emergética equivalente, no caso energia solar incorporada, adotando-se índices de Transformidade, que avaliam a qualidade do fluxo de energia dos serviços ambientais associados a determinado recurso natural ou antrópico. Tais índices são calculados por pesquisadores em todo o mundo, sendo amplamente divulgados em periódicos científicos e *sites* da internet especializados,
- ii. conversão da emergia calculada em valores monetários por meio do índice de equivalência emergia/dólar calculado para o Brasil. Tal índice permite comparar a emergia do serviço afetado à emergia do dinheiro que circula no país em determinado ano, possibilitando a conversão dos valores de energia em dinheiro,
- iii. conversão do valor em dólar para real, utilizando o câmbio atual.

Determinação da Massa de Água

A determinação da massa de água, necessária para que o parâmetro glifosato atinja a concentração estabelecida na legislação pertinente para o enquadramento do curso de água, foi realizada a partir da **Equação 2**:

$$M = \frac{1 \text{ kg}}{L} \cdot c/L \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

M = Massa de água necessária para para diluir o agrotóxico (glifosato), até o limite estabelecido para o enquadramento do curso de água, Classe 2, e limite estabelecido em MINAS GERAIS (2020) (kg);

c = carga de glifosato lançada (kg);

L = limite de glifosato legalmente permitido (MINAS GERAIS, 2020) (kg/L).

Para quantificação da carga do contaminante, foram considerados:

- Volume inicial de glifosato concentrado ($V_{\text{glifosato}}$): 100 litros = 100.000 mL
- Concentração do princípio ativo considerado (C_{IA}): 79,25% (ou 0,7925)

Cabe considerar que, para fins de cálculos, o glifosato 79,25% refere-se à concentração do ingrediente ativo em formulações comerciais de herbicidas, como, por exemplo, o produto Scout® e o glifosato 720 WG Perterra. Essa concentração indica que 79,25% do peso do produto é composto pelo sal de amônio do glifosato, que é o ingrediente ativo responsável pela ação herbicida. O restante da formulação inclui outros componentes, como solventes e adjuvantes, que auxiliam na aplicação e eficácia do produto.

- Densidade do glifosato: $\rho = 1,71 \text{ g/mL}$ [IUPAC, 2025]
- Concentração final permitida (C_f): $65 \text{ } \mu\text{g/L} = 0,000065 \text{ g/L}$ [MINAS GERAIS, 2022]

a. Determinação da Densidade da Solução

A solução contaminante é formada por 100 litros de glifosato comercial (a 79,25%) com densidade de $1,71 \text{ g/mL}$ e 3.900 L (ou 3.900 kg) de água.

Logo,

- A massa do produto (m_{produto}) é dada pela **Equação 3**:

$$m_{\text{produto}} = V_{\text{produto}} \cdot \rho_{\text{produto}} \quad \text{Equação 3}$$

- A massa total da solução ($m_{\text{solução}}$) é obtida pela **Equação 4**:

$$m_{\text{solução}} = m_{\text{produto}} + m_{\text{água}} \quad \text{Equação 4}$$

- A **Equação 5** fornece a densidade da solução ($\rho_{\text{solução}}$):

$$\rho_{\text{solução}} = \frac{m_{\text{solução}}}{V_{\text{solução}}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

V_{produto} : Volume do produto comercial considerado¹

ρ_{produto} : densidade do produto comercial considerado

$m_{\text{água}}$: massa de água da solução com o produto considerado

b. Cálculo da Massa de glifosato Puro

Conhecendo o volume e a densidade, pode-se calcular a massa total do produto (m_{total}) pela **Equação 6**:

$$m_{\text{total}} = V_{\text{glifosato}} \cdot \rho \quad \text{Equação 6}$$

A massa de glifosato puro – princípio ativo – ($m_{\text{glifosato}}$) é obtida pela **Equação 7**:

$$m_{\text{glifosato}} = m_{\text{total}} \cdot C_f \quad \text{Equação 7}$$

c. Cálculo do Volume Final para Atingir a Concentração Permitida na Água de $65 \text{ } \mu\text{g/L}$

A concentração final (C_f) desejada é oferecida pela aplicação da **Equação 8**:

$$C_f = \frac{m_{\text{glifosato}}}{V_f} \quad \text{Equação 8}$$

d. Cálculo da Energia Potencial Associada

A energia potencial (E_p) associada à massa de água definida anteriormente foi obtida, conforme **Equação 9**:

$$E_p = M \cdot g \cdot h \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

E_p = Energia potencial;
 M = Massa de água (conforme Equação 2);
 g = aceleração da gravidade (9,8 m/s);
 h = diferença das cotas entre o ponto de lançamento e exutório do Rio Formiga (metros).

Para estabelecer a diferença de altitude (h) entre o ponto de lançamento do contaminantes – Ponto 1 (h_1) e o local considerando como onde ocorreu a diluição – Ponto 2 (h_2), utilizou-se o Google Earth Pro® para verificar as cotas dos pontos de lançamento e de depuração. O valor da diferença de altitude (h) foi utilizado no cálculo da energia potencial obtido pela Equação 9.

e. Cálculo da Energia Incorporada (Emergia)

A energia potencial foi convertida em energia incorporada (Emergia), considerando fator de conversão apresentado na literatura, conforme **Equação 10**, de modo a se estimar os serviços ecossistêmicos responsáveis pela diluição do contaminante:

$$EM = E_p \cdot F \quad \text{Equação 10}$$

Onde,
 EM = Emergia (sej);
 E_p = Energia potencial (J) (Equação 9);
 F = Fator de conversão

Por fim, os serviços ecossistêmicos, em bases energéticas, foram convertidos em valores monetários, a partir da **Equação 11**:

$$EMDólar = \frac{EM}{TED} \quad \text{Equação 11}$$

Onde,
 EM Dólar = Emergia do dolar;
 EM = Emergia (sej).
 TED = Transformidade Emergia-Dolar

RESULTADOS OBTIDOS

Caracterização do glifosato e do dano ambiental

O glifosato ($C_3H_8NO_5P$) é um herbicida não seletivo, de amplo espectro, comumente utilizado para controle de ervas daninhas e gramíneas em diversas culturas agrícolas. Embora não seja considerado persistente no solo, sua permanência em sistemas aquáticos pode ser prolongada, especialmente sob determinadas condições ambientais. Apresenta toxicidade moderada para seres humanos, organismos aquáticos, aves, minhocas e abelhas, além de propriedades irritantes para os olhos (IUPAC, 2025). A **Figura 1** demonstra a estrutura do glifosato.

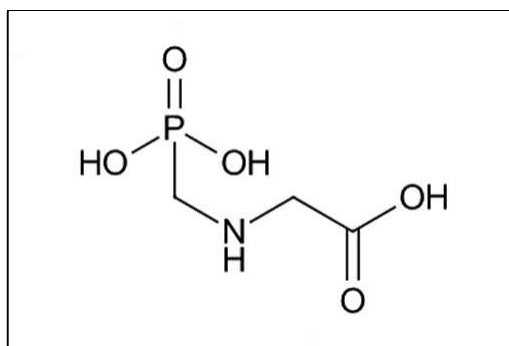


Figura 1: Estrutura do Glifosato. Fonte: IUPAC (2025).

A **Tabela 1** apresenta suas principais propriedades físico-químicas, incluindo dados de volatilidade, lixiabilidade, persistência e toxicidade ambiental. Ressalta-se sua baixa volatilidade, baixa lixiabilidade (GUS e GOSS/LE), mas alta solubilidade em água – o que potencializa sua capacidade de contaminar águas superficiais.

Tabela 1: Características do glifosato. Fonte: IUPAC (2025). Goss (1992), GUSTAFSON (1989). SARAIVA SOARES (2015).

Propriedades físico-químicas (IUPAC)						GOSS			
Solubilidade (mg.L ⁻¹)	log K _{ow}	PV (mPa)	DT ₅₀ solo (dias)	K _{oc} (mL.g ⁻¹)	Câncer	GUS	LE	AD	SL
100.000	-6,28	0,0131	17,3	1.424	?	0,29	P	M	M

Notas: (S) Solubilidade em água a 20 °C; (K_{ow}) Coeficiente de partição octanol-água, pH 7, 20°C; (PV) Pressão de vapor a 25 °C; (DT₅₀) Meia-vida típica; (K_{oc}) Coeficiente de sorção normalizado para matéria orgânica; (?) Possibilidade em causar câncer; (P) Pequeno; (M) Médio; (AD) Transporte associado ao solo; (SL) Transporte dissolvido em água; (*) Resultados obtidos da IUPAC.

Estudos citados por Soares (2015) e IUPAC (2025) evidenciam efeitos crônicos do glifosato sobre organismos não alvo, incluindo disfunções reprodutivas, imunológicas e endócrinas em espécies aquáticas e terrestres. A exposição contínua, seja por consumo de água contaminada, ingestão de alimentos irrigados ou contato com ambientes tratados, pode resultar em efeitos genotóxicos, citotóxicos e hormonais. A contínua e crescente detecção do glifosato em água potável, alimentos e solo têm levantado preocupações em instituições internacionais (SARAIVA SOARES, 2015). A exposição contínua pode ocorrer por meio do consumo de água contaminada, alimentos irrigados com essa água ou contato direto em ambientes de aplicação. Há evidências de que o glifosato pode provocar efeitos citotóxicos e genotóxicos em níveis elevados ou com exposição repetida, além de potenciais efeitos hormonais. Destaca-se que, embora o glifosato tenha uma afinidade pelo solo (adsorção em partículas), sua mobilidade depende da composição do solo e do clima (IUPAC, 2025).

Em solos saturados ou arenosos, a mobilidade é ampliada, favorecendo a contaminação de aquíferos. Tais características tornam o glifosato um contaminante potencial de corpos hídricos, com sérias implicações para a saúde ambiental.

À luz da legislação vigente, a contaminação das águas do Rio Formiga por glifosato configura-se como dano ambiental, nos termos do Art. 3º, III da Lei Federal nº 6.938/81 (Política Nacional do Meio Ambiente), e da Instrução Normativa IBAMA nº 20/2024. Essa última norma define dano ambiental como: “Toda lesão causada ao meio ambiente, decorrente da degradação de atributos ambientais por meio de omissões, ações e atividades não autorizadas ou em desacordo com as autorizações vigentes, que atente contra o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.”

O glifosato, substância sintética de uso amplamente difundido, pertence ao grupo dos herbicidas organofosforados e à classe das fosfonoglicinas. De acordo com a International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), trata-se de composto com massa molecular de 169,1 g/mol e registro CAS RN 1071-83-6, que apresenta elevado risco de contaminação devido à sua alta solubilidade em água e relativa estabilidade em solos e ambientes aquáticos (IUPAC, 2025).

A FISPQ do produto denominado Dunn NA (não agrícola), fabricado pela Sumitomo Chemical Indústria Química SA, e do produto Scout NA, fabricado pela Monsanto do Brasil Ltda., classificam o glifosato como muito tóxico para organismos aquáticos, perigoso ao ambiente aquático – agudo e crônico. Solúvel em água. É medianamente persistente no latossolo vermelho escuro e muito persistente em areia quartzosa, imóvel no latossolo vermelho escuro, terra roxa estruturada e areia quartzosa, apresentando um coeficiente de mobilidade (Rf) igual a zero.

Essas características tornam o glifosato especialmente propenso a atingir cursos d’água por meio do escoamento superficial (*runoff*), sobretudo em períodos chuvosos, permanecendo ativo por longos períodos e provocando impactos sobre a biota aquática, incluindo algas, peixes e invertebrados. Seu principal metabólito, o ácido aminometilfosfônico (AMPA), também é frequentemente detectado em águas superficiais.

Em relação à carcinogenicidade, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) classifica o Glifosato como não carcinogênico. Em 2015 a Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (IARC) classificou o glifosato como Provável Carcinogênico para Humanos. Este achado foi considerado pela ANVISA na revisão do Glifosato de 2018/2019. A International Union Of Pure And Applied Chemistry (IUPAC) também corrobora com esse entendimento e classifica o glifosato como provável carcinogênico para humanos (IUPAC, 2025).

Estudos citados por Saraiva Soares (2015) e pela IUPAC (2025) evidenciam efeitos crônicos do glifosato sobre organismos não alvo, incluindo disfunções reprodutivas, imunológicas e endócrinas em espécies aquáticas e terrestres. A exposição contínua, seja por consumo de água contaminada, ingestão de alimentos irrigados ou contato com ambientes

tratados, pode resultar em efeitos genotóxicos, citotóxicos e hormonais. A contínua e crescente detecção do glifosato em água potável, alimentos e solo têm levantado preocupações em organismos internacionais. A IUPAC destaca que, embora o glifosato tenha uma afinidade pelo solo (adsorção em partículas), sua mobilidade depende da composição do solo e do clima. A solubilidade do glifosato em água a 20°C, de acordo com IUPAC (2025), é alta e igual a 1.000 mg/L.

Além disso, a mobilidade do glifosato é dependente da composição do solo e das condições climáticas. Em solos saturados ou arenosos, a mobilidade é ampliada, favorecendo a contaminação de aquíferos. Tais características tornam o glifosato um contaminante potencial de corpos hídricos, com sérias implicações para a saúde ambiental.

Valoração do dano ambiental

Localização, extensão e vazão dos trechos do Rio Formiga que foram considerados no processo de diluição do glifosato

A **Figura 2** e a **Tabela 1** demonstram, respectivamente, a localização dos pontos e dos trechos dos cursos de água considerados no estudo para determinação do VUI, bem como extensão e vazão por trecho dos cursos de água considerados.

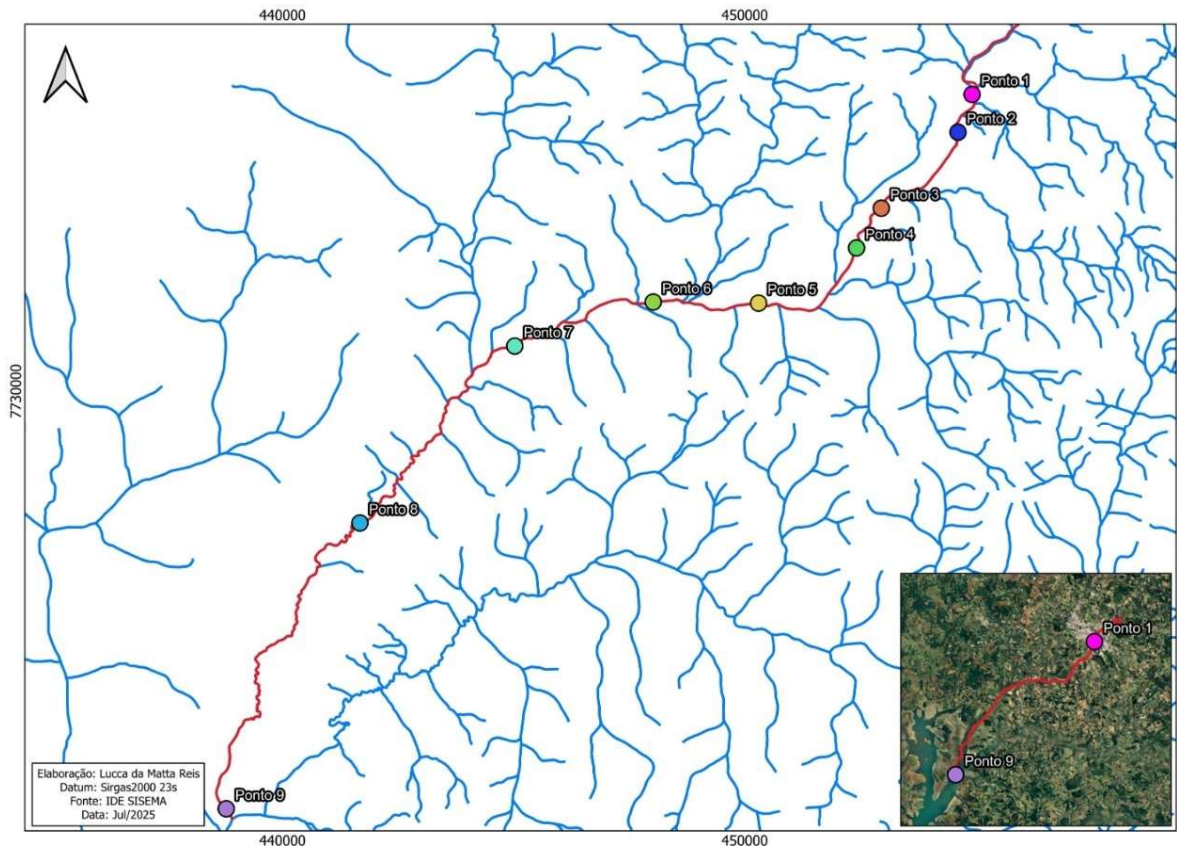


Figura 2: Localização dos pontos e trechos considerados no estudo de diluição do contaminante (glifosato) nas águas da bacia do Rio Formiga. Fonte: Elaborado a partir de IDE SISEMA.

Tabela 1: Vazões e extensões dos trechos dos cursos de água na Sub-bacia do Rio Formiga, afetados pela contaminação. Fonte: IDE-SISEMA (2025).

Pontos	Trechos	Extensões (km)	Coordenadas Geográficas		Vazões - Q ₉₀ (L/s)
			X	Y	
Ponto 1	-	2,5	20°28'13.24"	45°25'56.23"	1,371109
Ponto 2	T1	3,5	20°28'39.74"	45°26'6.80"	1,40662
Ponto 3	T2	6	20°29'32.96"	45°27'4.20"	1,500637
Ponto 4	T3	7,1	20°30'0.80"	45°27'22.79"	1,512508

Pontos	Trechos	Extensões (km)	Coordenadas Geográficas		Vazões - Q ₉₀ (L/s)
			X	Y	
Ponto 5	T4	9,9	20°30'39.38"	45°28'36.08"	1,745322
Ponto 6	T5	12,2	20°30'38.37"	45°29'54.73"	2,191796
Ponto 7	T6	15,6	20°31'9.01"	45°31'38.27"	2,289565
Ponto 8	T7	21,4	20°33'13.60"	45°33'34.35"	3,230711
Ponto 9	T8	30	20°36'34.05"	45°35'15.00"	3,302153

Notas: 1) Extensões obtidas utilizando ferramentas de medição do *software* de geoprocessamento ArcGis®.

Vazão Q₉₀ refere-se àquela que é igualada ou superada em 90% do tempo em um determinado local e período. É uma medida de vazão de referência, utilizada para definir a quantidade mínima de água que deve ser mantida em um curso d'água, seja para a garantia de abastecimento ou para a preservação do ecossistema.

Quantificação do dano

No caso em análise, a solução contaminante é formada por 100 litros de glifosato comercial (a 79,25%) com densidade de 1,71 g/mL e 3.900 L (ou 3.900 kg) de água. Logo:

- A massa do produto - $M_{\text{produto}} = 100.000 \text{ mL} \times 1,71 \text{ g/mL} = 171.000 \text{ g} = 171 \text{ kg}$
- A massa de água, considerando densidade da água igual a 1 g/mL - $M_{\text{água}} = 3.900 \text{ L} = 3.900 \text{ kg}$
- A massa total da solução - $M_{\text{solução}} = 171 \text{ kg} + 3.900 \text{ kg} = 4.071 \text{ kg}$
- Volume da solução (glifosato + água) = 4.000 L
- A densidade da solução - $\rho_{\text{solução}} = \frac{4.071.000 \text{ g}}{4.000.000 \text{ mL}} = 1,01775 \text{ g/mL}$

Cálculo da Carga do Glifosato (c)

A partir do volume e da densidade, pode-se calcular a massa total do produto:

$$m_{\text{total}} = 100.000 \cdot 1,71 = 171.000 \text{ g}$$

Na sequência, obteve-se a massa (carga - c) de glifosato puro (princípio ativo):

$$c = 171.000 \cdot 0,7925 = 135.517,5 \text{ g ou } 135,52 \text{ kg}$$

Assim, a massa de água necessária para a diluição do contaminante até os níveis admitidos na legislação será:

$$M = \frac{1 \text{ kg}}{\text{L}} \cdot \frac{135,52 \text{ kg}}{65 \times 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 2,08 \times 10^9 \text{ kg de água}$$

$$\text{Massa de água necessária para a diluição} = 2,08 \times 10^9 \text{ kg} = 2,08\text{E}+8 \text{ kg}$$

Cálculo da Energia Potencial Associada

Para estabelecer a diferença de altitude (h), foram identificados o ponto de contaminação das águas - Ponto 1 (h₁) = 762 m e o local onde ocorreu a diluição - Ponto 2 (h₂) = 888 m. Logo, h = 126 metros.

$$\text{A energia potencial correspondente será: } E_p = 2,08 \times 10^9 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 126 \text{ m} = 2,57\text{E}+12 \text{ J}$$

Cálculo da energia incorporada (Emergia)

A energia potencial foi convertida em energia incorporada (Emergia), considerando fator de conversão apresentado na literatura, de modo a se estimar os serviços ecossistêmicos responsáveis pela diluição do contaminante.

De acordo com Ortega (2000), a transformidade referente a Rios - *Escoamento gravitacional* é 27.874 sej/J. Assim, a conversão da energia potencial para Emergia (Equação 10) resultou em: **Emergia = 7,18E + 16 $\frac{\text{sej}}{\text{dia}}$**

Precificação

Conversão Emergia-Dólar (EM Dolar)

De acordo com Ortega (2000), a transformidade EMergia-Dólar = 3,0 E+12 sej/U\$, logo:

$$EMDólar = \frac{Energia}{Transformidade Energia - Dólar} = \frac{7,18 + 16}{3,0E + 12} = U\$ 23.920,19$$

Conversão Dólar-Real

Cotação do Dólar em 18/07/2025: R\$ 5,59 (ECONOMIA, 2025). Assim, o custo ambiental da contaminação dos cursos de água (VUI) equivale a R\$133.713,88. A valoração monetária dos serviços ecossistêmicos e, portanto, o cálculo do Valor de Uso Indireto – VUI está apresentada na **Tabela 2**.

Tabela 2: Valores calculados para os danos ocasionados pela contaminação por glifosato.

Serviços Ambientais	Carga Total, (kg) ^(a)	Massa de água para diluição, (kg) ^(b)	Energia Potencial (J) ^(c)	Transformidade Energia (sej/J) ^(d)	Energia Emdólares (sej)	Emdólares (US) ^(e)	Reais (R\$) ^(f)
Diluição	135,52	2,85E+9	2,57E+12	2,7874E+4	7,18E+16	2,39E+4	133.713,88

a) Carga = concentração x vazão; b) $M = \frac{1kg}{L} \cdot c / L$; c) $Ep = M \cdot g \cdot h$; d) Ortega, 2000; e) EMDólar = dólares emergéticos = energia / Transformidade - Energia-Dólar, onde: Transformidade Energia-Dólar = $3,0 \times 10^{12}$ sej/US; f) U\$1,00 = R\$5,59 (câmbio - cotação em 18/07/2025).

CONCLUSÃO

A introdução do agrotóxico glifosato nos cursos d'água da sub-bacia do Rio Formiga resultou em degradação da qualidade ambiental, comprometendo os atributos físicos, químicos e ecológicos do recurso hídrico.

A análise demonstrou que o glifosato, em razão de sua alta solubilidade em água é capaz de atingir os cursos d'água por escoamento superficial e ocasionar dano à qualidade das águas e aos organismos aquáticos. A valoração econômica do dano, realizada por meio do cálculo do Valor de Uso Indireto (VUI), com base na metodologia emergética, permitiu estimar os custos ambientais associados à contaminação. Esse valor correspondeu a R\$ 133.713,88 (cento e trinta e três mil, setecentos e treze reais e oitenta e oito centavos).

Dessa forma, fica evidenciada a necessidade de responsabilização e reparação pelos danos ambientais causados, conforme determina o princípio do poluidor-pagador e os instrumentos legais de proteção ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 14.653-6:2008 - Versão corrigida: 2009**. Avaliação de bens: parte 6: recursos naturais e ambientais. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
2. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Instrução Normativa IBAMA nº 20, de 27 de setembro de 2024**. Estabelece procedimentos para a cobrança da reparação por danos ambientais pela via administrativa em decorrência de fatos apurados na aplicação de sanções administrativas pelo Ibama. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=139429>. Acesso: jul. 2025.
3. International Union Of Pure And Applied Chemistry (IUPAC). **Pesticide properties database (PPDB)**. Disponível em: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/Reports/373.htm> Acesso em: jul. 2025.
4. Minas Gerais. Ministério Público. Procuradoria Geral de Justiça. Central de Apoio Técnico **Valoração econômica de danos ambientais: coletânea da Central de Apoio Técnico do Ministério Público de Minas Gerais**/ Editores: Alexandra Fátima Saraiva Soares, Paula Santana Diniz. - Belo Horizonte: CEAf, 2020. 322p. Disponível em: https://www.cnmp.mp.br/portal/images/CMA/valoracao/Valoracao_economica_de_danos_ambientais_-_CEAT.pdf. Acesso: jul. 2025. Publicada no Diário do Executivo, Minas Gerais, 02/12/2022.
5. Minas Gerais. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH nº 8, de 21 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

6. Mota, José Aroudo. **A valoração da biodiversidade: conceitos e concepções metodológicas**. In: MAY, Peter H. Economia do Meio Ambiente: teoria e prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
7. Motta, R. S. **Manual de Valoração**. Brasília: MMA, 1998. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/publica/mvalora/sumario.html>. Acesso: jul. 2025.
8. Odum, Howard T. **Environmental accounting, emergy and decision making**. New York: Wiley, 1996. 370 p.
9. Ortega, E. **Contabilidade e Diagnóstico de Sistemas Usando os Valores dos Recursos Expressos em Emergia**. Campinas: UNICAMP/DEA, 2000. 38 p.
10. Pillet, G. **Economia Ecológica: Introdução à economia do ambiente e dos recursos naturais**. Lisboa: Instituto Piaget, 1997.
11. Saraiva Soares, A.F. **Impacto do uso de agrotóxicos na qualidade da água. Estudo de caso em região produtora de café**. 1ª. ed. Berlim: Novas Edições Acadêmicas, 2015. v. 1. 295p.