

VALORAÇÃO DOS DANOS AOS RECURSOS HÍDRICOS EM BRUMADINHO

Alexandra Fátima Saraiva Soares¹

Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG)

Paula Santana Diniz²

Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG)

Luís Fernando de Morais Silva³

Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MPMG)

Artigo recebido em: 16/09/2019.

Artigo aceito em: 29/07/2020.

Resumo

Este artigo apresenta metodologia de valoração de dano ambiental ocasionado por rompimento de barragem de rejeito, cuja consequência é o comprometimento da qualidade da água superficial para abastecimento público. Trata-se de pesquisa aplicada com estudo de caso para demonstrar a metodologia sugerida. O artigo apresenta valoração dos danos à qualidade da água ocasionados pelo rompimento da barragem B1, em Brumadinho. Desde o rompimento da estrutura, que

propiciou extravasamento dos rejeitos, que atingiram o Rio Paraopeba e comprometeram a qualidade das águas, foram suspensas as captações para abastecimento nesse manancial. Neste artigo, procedeu-se a caracterização, a quantificação e a valoração dos danos advindos dessa poluição. Foi aplicada a formulação do Valor Econômico do Recurso Ambiental e considerados os valores de uso direto e indireto dos recursos hídricos afetados. Para o cálculo do valor de uso direto, utilizou-se como referência o valor

1 Pós-doutora em Direito Público pela Università degli Studi di Messina (UNIME). Doutora e mestra em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Especialista em Direito Ambiental e Sustentabilidade pela Escola Superior Dom Helder Câmara (ESDHC). Especialista em Direito Sanitário pela Escola de Saúde Pública de Minas Gerais (ESP-MG). Especialista em Direito Ambiental pela AVM Faculdade Integrada. Especialista em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Graduada em Direito pela Faculdade Pitágoras de Administração Superior (FPAS). Graduada em Engenharia Civil (com ênfase em Saneamento) pela UFMG. Perita Ambiental no MPMG. Professora no MBA em Perícia e Valoração de Danos Ambientais do Instituto de Educação Continuada (IEC/PUC-MINAS). Professora de Graduação e Pós-graduação (cursos de Direito e Engenharias). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-627X> / e-mail: asaraiva.soares@gmail.com

2 Mestra em Engenharia Nuclear pela UFMG. Especialista em Meio Ambiente pela UFMG. Graduada em Engenharia Química pela UFMG. Perita ambiental no MPMG. E-mail: paula.sdiniz@gmail.com

3 Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Graduado em Engenharia Ambiental pela UFMG. Estagiário de Pós-graduação no MPMG. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3027-1958> / e-mail: luismorais96@gmail.com

de mercado (tarifa média) do serviço público de fornecimento de água potável, referente a 2019. Para cálculo do valor de uso indireto, utilizou-se o conceito de Emergia, que considera serviços ecossistêmicos e corresponde à energia solar que foi previamente requerida, direta ou indiretamente,

para produzir o recurso afetado. O método de valoração utilizado resultou em um *quantum debeatur* diário de R\$ 5.210.243,30.

Palavras-chave: dano ambiental; poluição hídrica; resíduo de mineração; valoração ambiental.

VALUATION OF THE DAMAGE TO WATER RESOURCES IN BRUMADINHO

Abstract

This work presents a methodology for valuing environmental damage caused by the rupture of tailings dam, harming the quality of water for public supply. This is applied research with a case study to demonstrate the suggested methodology. The work presents an assessment of the damage to water quality caused by the rupture of the B1 dam, in Brumadinho. Since the rupture of the structure, which led to overflow of the tailings, which reached the Paraopeba River and compromised the quality of the water, the abstraction for supplying was suspended. This work proceeded to the characterization, quantification and valuation of the damage resulting from this pollution. The formulation of the Economic Value of

the Environmental Resource was applied, and the values of direct and indirect use of the affected water resources were considered. For the calculation of the direct use value, the market value (average tariff) of the public drinking water service, referring to 2019, was used. In order to calculate the value of indirect use, the Emergia concept was used, which considers ecosystem services and corresponds to solar energy that was previously required to produce the affected resource. The methodology estimated that the quantum debeatur was R\$ 5,210,243.30 per day.

Keywords: environmental damage; environmental valuation; mining waste; water pollution.

Introdução

Brumadinho (MG), município localizado na Região Metropolitana de Belo Horizonte, tem população estimada para 2018 de 39.520 habitantes (IBGE, 2019). A principal atividade econômica desse município é a mineração de ferro, que gera resíduos no processamento. Esses resíduos, que são monitorados por alertas visuais ou sonoros em tela, são gerados pelo beneficiamento de minérios por via úmida – ou seja, graças às etapas da mineração, apresentam quantidades substanciais de água –, técnica que apresenta risco de rompimento das barragens, especialmente em função do método construtivo com alteamentos *a montante*.

Assim, no dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeitos B1 do Complexo da Mina Córrego Feijão, situada em Brumadinho, rompeu, liberando para o ambiente grande volume de lama. A mencionada barragem apresentava volume de 12,7 milhões de metros cúbicos na ocasião do acidente (MPMG, 2019). Diversas edificações foram afetadas pelo escoamento desses resíduos, conforme ilustrado na Figura 1, resultando em grande número de óbitos (259 mortos e 11 desaparecidos) e dano ambiental de elevada dimensão e repercussão (FREITAS; ALMEIDA, 2020).

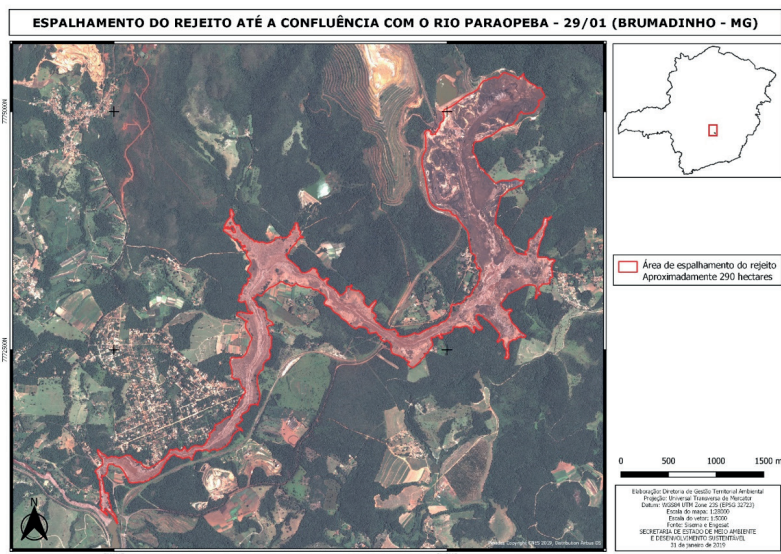


Figura 1 Mapa das edificações afetadas pelo rompimento.

Fonte: SEMAD (2019).

Além das perdas de vidas humanas, os rejeitos da barragem ocasionaram impactos negativos nos âmbitos social e ambiental, sobretudo em razão do dano

ocasionado na vegetação e na alteração da qualidade das águas da bacia do rio Paraopeba.

As funções dos ecossistemas fluviais, que podem ser traduzidas em serviços, são diversas. Entre estas destacam-se: a disponibilidade de água para irrigação ou outras atividades, a produção de alimento e outros bens (pesca e outros), a regulação do clima, a regulação de enchentes, a reciclagem de nutrientes, o turismo, o lazer, a cultura e a disponibilidade de água para potabilização (SABATER; ELO-SEGI, 2016). Cabe destacar que o Rio Paraopeba, atingido pelos rejeitos, constitui importante manancial de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e outras cidades.

A Figura 2 demonstra o espalhamento do rejeito em Brumadinho até a confluência com o Rio Paraopeba, abrangendo uma área de aproximadamente 290 hectares (SEMAD, 2019).

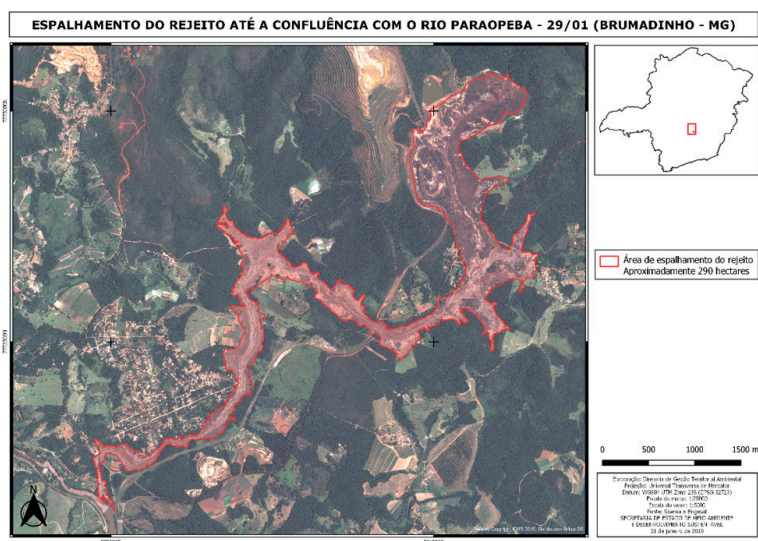


Figura 2 Mapa do espalhamento do rejeito em Brumadinho.

Fonte: SEMAD (2019).

Assim, o objetivo deste artigo é apresentar a valoração dos danos à qualidade das águas superficiais ocasionados pelos resíduos provenientes do rompimento da barragem B1 no Complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais. Também serão demonstrados os principais métodos de valoração de dano ambiental, a fim de justificar a metodologia aplicada ao estudo de caso.

Trata-se de pesquisa aplicada, com apresentação de estudo de caso, para demonstrar a metodologia selecionada. Procedeu-se à caracterização, à quantificação e à valoração dos danos.

Para demonstrar os principais métodos de valoração ambiental, realizaram-se buscas nas bases de dados Web of Science, Scopus e Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os termos utilizados nas buscas foram: “Método de valoração ambiental”; “Emergia”; “Valor econômico de recurso ambiental” e “Environmental valuation method”, com auxílio do operador booleano “AND”, que compila a busca de todos os termos nos resultados da pesquisa. Foram considerados os artigos originais, editoriais e notas técnicas disponíveis na íntegra, além de materiais eletronicamente publicados.

Nesse processo, foram levantados 66 artigos, os quais foram analisados, inicialmente, pelo título e, em seguida, pelo resumo. Foram conduzidas leituras analíticas nos textos que não apresentaram informações suficientes que possibilitassem sua seleção ou exclusão. A seleção dos materiais utilizados foi realizada por todos os autores e as divergências resolvidas de maneira consensual. Nos materiais com assuntos relacionados diretamente com a metodologia de valoração ambiental e/ou valoração de dano ocasionado aos recursos hídricos por efluentes líquidos, foram conduzidas leituras minuciosas, de maneira analítica e interpretativa. Foram selecionados 21 artigos para leitura na íntegra. A amostra final dessa revisão consistiu em cinco textos, que foram utilizados na elaboração deste artigo. No estudo de caso, a caracterização dos danos valorados foi realizada com base nos dados disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), referentes aos resultados dos parâmetros de qualidade das águas monitorados, no período de 25 de janeiro de 2019 a 3 de fevereiro de 2019, ao longo do Rio Paraopeba, após o rompimento da barragem B1 (IGAM, 2019).

A rede de monitoramento de qualidade das águas e sedimento do IGAM conta com dez estações de monitoramento, cuja localização é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 Localização das estações automáticas de monitoramento

Ponto	Localização
BP-036	Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco
BPE-1	Córrego Ferro e Carvão na confluência com o Rio Paraopeba
BPE-2	Rio Paraopeba na captação da COPASA
BP-068	Rio Paraopeba, 5 km a jusante da captação da COPASA em Brumadinho
BP-070	Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas, no Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão
BP-072	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba
BP-082	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas
BP-083	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba
BP-078	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Pardo em Pompéu
BP-099	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias

Fonte: IGAM (2019).

Na avaliação e quantificação dos danos ocasionados pela contaminação dos recursos hídricos, foram desconsiderados os resultados dos parâmetros monitorados na Estação BP-036, uma vez que nesta se encontra a montante da área onde ocorreu o lançamento dos rejeitos (lama).

Os resultados do monitoramento das águas superficiais foram comparados aos padrões de referência, estabelecidos para águas doces de classe 2, na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 5 de maio de 2008 e Resolução CONAMA n. 357/2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, para a identificação dos poluentes responsáveis pelos impactos negativos, ocasionados no Rio Paraopeba, após o rompimento da barragem B1 (MINAS GERAIS, 2008; CONAMA, 2005).

1 Valoração econômica dos danos no estudo de caso

A metodologia para a valoração dos danos utilizou a formulação do Valor Econômico do Recurso Ambiental (VERA), incluída pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na Norma Brasileira – NBR 14.653:2008 (versão corrigida: 2009) – parte 6: recursos naturais e ambientais, 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 o quão melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas por causa das mudanças na quantidade de bens e serviços ambientais, seja na apropriação por uso ou não uso. Assim, de acordo com esse autor, o VERA compreende a soma dos valores de uso e de não uso, podendo ser expresso da seguinte maneira:

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

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 n. 4.339, de 22 de agosto de 2002, que institui princípios e diretrizes para a implantação da Política Nacional da Biodiversidade, também estabelece em seu Anexo (art. 2º, 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 (BRASIL, 2002).

No presente artigo, foram utilizados no cálculo da valoração o VUD e o VUI dos recursos hídricos afetados.

1.1 Cálculo do VUD

O VUD foi estimado com base no valor de mercado estabelecido para o benefício advindo da utilização das águas do Rio Paraopeba, após tratamento, como manancial de abastecimento.

Tendo em vista que a água constitui um importante insumo econômico, foi calculado, inicialmente, com base em dados de projeto da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e da concessionária Águas de Pará de Minas, o volume diário, em m^3 por dia, de água do Rio Paraopeba que ficou indisponível para a população abastecida por esse manancial desde a interrupção de sua captação em 25 de janeiro de 2019.

Posteriormente, para o cálculo do VUD, utilizou-se como referência o valor de mercado (tarifa média – R\$/ m^3) do serviço público de fornecimento de água potável, referente a 2019 e apresentado pela concessionária prestadora dos serviços na região de estudo (COPASA, 2019).

1.2 Cálculo do VUI

Para a estimativa do VUI foi utilizado o conceito de Emergia. A Emergia corresponde à energia solar que foi previamente requerida, direta ou indiretamente, para produzir certo produto ou serviço (ODUM, 1996).

Assim, o valor monetário dos serviços ambientais, afetados pelo lançamento da lama de rejeitos no Rio Paraopeba, foi quantificado pela metodologia, denominada no meio científico de metodologia emergética ou ecoenergética (ODUM, 1996; PILLET, 1997).

Neste artigo, para a determinação do VUI, foi enfatizado e analisado o serviço ambiental associado ao recurso natural considerado – água superficial contaminada pelo lançamento dos rejeitos oriundos da barragem B1.

A Emergia do serviço ambiental e seu respectivo valor monetário foram quantificados, inicialmente, por meio da estimativa da introdução no Rio Paraopeba de Sólidos em Suspensão Totais (SST), em kg/dia, presentes na lama. Em seguida, foi determinada a massa de água, em kg/dia, utilizada para a diluição do parâmetro SST até o padrão de referência, estabelecido para a classe 2, na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n. 1, de 5 de maio de 2008 e Resolução CONAMA n. 357/2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento (MINAS GERAIS, 2008; CONAMA, 2005).

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 SST a qual foi convertida, posteriormente, em uma medida emergética equivalente (SeJ/dia), por meio do fator de conversão de energia em Emergia, 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/U\$), 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 de 24 de julho de 2020 (1 dólar equivalendo a 5,21 reais).

2 Resultados

2.1 Métodos de Valoração Econômica dos Recursos Ambientais

Para Motta (1997), valorar economicamente um recurso ambiental consiste em determinar quanto melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas, em virtude de mudanças na qualidade e/ou quantidade de bens e serviços ambientais, seja na apropriação por uso ou não uso.

A importância da valoração ambiental encontra-se no fato de oferecer valor de referência para quantificar os danos ambientais monetariamente. Em âmbito nacional e até mundial, são utilizados diversos métodos de valoração, desenvolvidos para mensurar bens e serviços ambientais, cada qual com suas peculiaridades. Contudo, nem sempre um método se adequa a todos os casos de dano ambiental (MPMS, 2018; IBAMA, 2002).

No ordenamento jurídico brasileiro não há determinação de regra jurídica que estabeleça método ou critério de valoração de dano ambiental a ser, necessariamente, aplicado. Assim, a seleção deste, a ser utilizado no caso em análise fica a critério do perito, devendo, preferencialmente, contemplar os serviços ambientais envolvidos no cenário em questão. No entanto, muitas vezes, em função da restrição de dados disponíveis, dar-se-á preferência à aplicação de métodos mais simplificados (SOARES, 2019). Ademais, como ensina Magliano (2013), cada procedimento restringe-se a determinadas condições, podendo tornar-se insatisfatório e inaplicável em outros casos.

Não obstante inexistir regra jurídica para se empregar determinados métodos

de valoração, a norma técnica NBR 14653:2008, elaborada pela ABNT, sempre que aplicável, deve ser priorizada como referência nos cálculos.

A NBR 14653:2008 (versão corrigida: 2009), em sua parte 6, informa que não é possível estabelecer, *a priori*, a prevalência de um método de valoração de dano.

Ronaldo Serôa da Motta esclarece que o valor econômico dos recursos ambientais é derivado de todos os seus atributos e que essas características podem estar ou não associadas a um uso. Desse modo, o consumo de um recurso ambiental se realiza via uso e não uso (MOTTA, 1997). O autor informa, ainda, que um bem é homogêneo quando seus atributos ou características que geram satisfação de consumo não se alteram e que outros bens são, na verdade, parte de classes de bens ou serviços compostos. Nesses casos, cada membro da classe apresenta atributos diferenciados, como, por exemplo, imóveis, veículos, viagens de lazer e também recursos ambientais. Logo, o preço de uma unidade j do bem x_i , P_{xij} , pode ser definido por um vetor de atributos ou características, a_{ij} , conforme representado pela Equação 1:

$$P_{xij} = P_{xi} (a_{ij1}, a_{ij2}, \dots, a_{ijn})$$

(Equação 1)

No caso de um recurso ambiental, definem seus atributos, os fluxos de bens e serviços ambientais que são derivados de seu consumo. Entretanto, há atributos de consumo associados à própria existência do recurso ambiental, independentemente do fluxo atual e futuro de bens e serviços apropriados na forma de seu uso. Dessa maneira, é corriqueiro na literatura constatar a desagregação do VERA em VU e VNU.

Ronaldo Serôa da Motta explica que valores de uso podem ser, por sua vez, desagregados em:

- i. Valor de Uso Direto (VUD): quando o indivíduo se utiliza atualmente de um recurso, por exemplo, na forma de extração ou outro uso do recurso ambiental. Consiste no valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental em função do bem-estar que ele proporciona, por meio do uso direto;
- ii. Valor de Uso Indireto (VUI): quando o benefício atual do recurso deriva das funções ecossistêmicas, como, por exemplo, a proteção da fauna e flora aquáticas. É definido como o valor atribuído a um recurso ambiental em virtude de suas funções ecossistêmicas;
- iii. Valor de Opção (VO): quando o indivíduo atribui valor em usos direto e indireto que poderão ser optados em futuro

próximo e cuja preservação pode ser ameaçada. Por exemplo, o benefício advindo de fármacos desenvolvidos com base em propriedades medicinais ainda não descobertas de plantas em florestas tropicais;

iv. Valor de não-uso (ou valor passivo) representa o valor de existência (VE) que está dissociado do uso (embora represente consumo ambiental) e deriva-se de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de espécies não humanas ou preservação de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para o indivíduo (MOTTA, 1997, p. 11-12).

Há diversas classificações para os métodos de valoração econômica. Motta (1997) categoriza os métodos de valoração em dois tipos: função de produção e função da demanda. Esses métodos podem ser aplicados concomitantemente, em função do tipo de valoração pleiteada.

2.1.1 Métodos da função da produção

Os métodos da função da produção utilizam técnicas mais simplificadas para definição de valores. Nesse caso, o valor dos recursos é considerado insumo ou fator de produção.

Há duas subdivisões: *métodos de produtividade marginal e de mercados de bens substitutos*. Os primeiros, métodos de produtividade marginal, fundamentam-se no uso do preço de mercado para compor o valor econômico do recurso, uma vez que são valores reconhecidos pelo mercado. Consistem em métodos bastante aplicados por serem de fácil mensuração, mas desconsideram VO e VE.

Os métodos de mercado de bens substitutos empregam a mesma técnica dos métodos de produtividade marginal, uma vez que aplicam o preço de mercado. A base de cálculo dessa técnica consiste na reposição dos gastos requeridos para repor um bem ambiental avariado pela poluição ou uso inadequado. Esses métodos se subdividem em:

- i. custo de reposição: consiste naqueles que o usuário teve que arcar para substituir o bem ambiental de forma a garantir o nível desejado, como os custos de construção de piscinas públicas para garantir as atividades de recreação balneária quando as praias estão poluídas;
- ii. custos evitados: representa os gastos que o usuário arcou para substituir o bem original garantindo sua satisfação, como por exemplo, a aquisição de água tratada para substituir a água de reservatório de águas poluídas ou o custo que se deixou de arcar

- com determinado tratamento de água ou esgoto;
- iii. custos de controle: representa os gastos que o usuário tem para que o bem ambiental não se degrade ou não reduza seu estoque. Exemplo do pagamento das taxas de tratamento de esgotos para evitar a degradação dos recursos hídricos;
- iv. custo de oportunidade: mensura as perdas de renda devido aos investimentos realizados nas linhas de produção e consumo de bens e serviços privados por meio de adoção de medidas com objetivo de conservar ou preservar os recursos ambientais (MOTTA, 1997, p. 18-19).

2.1.2 Métodos da função da demanda

Os métodos de função de demanda estão baseados na vontade dos indivíduos em pagar para ter disponível determinado recurso ambiental ou aceitar compensação por sua perda. Esses métodos consistem em: método de mercado de bens complementares e método de valoração contingente e baseiam-se em pontos comuns que são a Disposição a Pagar (DAP) e a Disposição a Aceitar uma Compensação (DAC), segundo Custódio (2017). A DAP relaciona-se à quanto o indivíduo está disposto a pagar para que um bem ambiental não seja danificado. Por esse método se mensuram preferências pessoais que são expressas em curvas de demanda pessoal e se estabelecem pela Equação 2:

$$DAP = VM + EC$$

(Equação 2)

Onde:

DAP = Disposição a Pagar;

VM = Valor de Mercado;

EC = Excedente de Consumo.

EC, de acordo com Lima (2001), consiste na quantidade de renda que um indivíduo pagaria, além e acima de seu preço efetivo, de maneira a não ficar sem a quantidade desejada de um dado bem.

Na técnica de valoração denominada Métodos de Mercado e de Bens Complementares, o parâmetro de cálculo consiste na preferência dos indivíduos, revelada por meio de mercados reais, recorrendo à análise de valores de bens correlacionados ao bem ambiental, em que este complementa aquele, tornando-o mais valioso. O valor do bem permite valorar o recurso ambiental pretendido (SOARES, 2019).

Custódio (2017) esclarece que, assim como mercados de bens e serviços privados, substitutos a bens e serviços ambientais podem oferecer medidas de valor de uso dos recursos ambientais – quando representam a produção de um bem de demanda final que não tem preço observável –, também mercados de bens e serviços privados complementares a bens e serviços ambientais podem ser utilizados para mensuração do valor de uso de um recurso ambiental. Aqueles bens consumidos em proporções constantes entre si são denominados bens perfeitamente complementares.

Nesse contexto, uma análise que recorra aos mercados desses bens e serviços privados complementares pode gerar informações sobre a demanda do bem ou serviço ambiental relacionado com estes. Assim, se determinado bem é um complemento perfeito de outro, seu valor será desprezível, se a demanda pelo outro bem também for insignificante (MOTTA, 1997).

As classificações para esse método são duas: preços hedônicos e custo de viagem. O preço hedônico faz uso de um bem privado que apresente atributos complementares, bens ou serviços ambientais. O preço implícito do bem ou serviço ambiental é obtido por meio da identificação do valor do bem complementar. Custódio (2017) cita que o exemplo mais trivial é pertinente à área imobiliária, onde se levanta o valor de imóveis em diferentes locais com distintos níveis de atributos ambientais (CUSTÓDIO, 2017).

O método de valoração contingente ou de mercado hipotético é o único que considera o valor de existência de um bem ambiental, tendo, assim, aplicação mais ampla, já que é capaz de captar particularidades objetivas e subjetivas dos fenômenos. Consiste na condução de pesquisas ou aplicação de questionários para indicar o DAP ou DAC dos indivíduos em relação a determinado bem ou qualidade ambiental e estima valores de uso e/ou de existência do bem, situando-o em caso hipotético em condições atuais e/ou futuras por meio de diferentes cenários – situações hipotéticas aproximadas do contexto real. As etapas para aplicação desse método contemplam (TOLMASQUIM *et al.*, 2000 *apud* CUSTÓDIO, 2017, p. 90):

- definição do bem ambiental a ser valorado, determinar se o mecanismo será DAP ou DAC;
- definição do instrumento de pagamento em pecúnia ou compensação;
- seleção da forma de resposta para valorar o DAP ou DAC;
- elaboração dos itens do questionário;
- definição da amostra de população a ser entrevistada;
- caracterização da forma de aplicação do questionário, determinação do conteúdo das informações que devem ser prestadas no questionário;
- análise dos questionários respondidos;
- cálculo da medida monetária.

Essa técnica de valoração aproxima e apresenta o interesse da sociedade em relação a determinado bem ambiental. Dessa maneira, atende ao princípio da participação comunitária na tomada de decisões sobre o uso ou não uso do bem.

2.1.3 Valoração monetária dos serviços ecossistêmicos – Emergia

O bem-estar da sociedade é garantido por bens e serviços fornecidos pelos ecossistemas. Esses serviços estão relacionados com o equilíbrio ecológico, notadamente quanto a sua estrutura e suas funções, que são comprometidas pela introdução de poluentes no ecossistema. Assim, os desequilíbrios ecológicos são diretamente relacionados à degradação dos serviços ecossistêmicos que, por sua vez, resultam em prejuízos para toda a sociedade. São essas perdas que a sociedade procura evitar ao estabelecer medidas de controle das emissões e monitorar a qualidade dos diferentes meios da biosfera (ULGIATI; BROWN, 2002; CHRIS-TÓFARO, 2012).

Diante disso, a avaliação dos impactos negativos decorrentes da introdução de poluentes nos ecossistemas, comprometendo seus serviços, corresponde a uma avaliação do desequilíbrio ecológico, que pode ser demonstrada em termos biofísicos (por unidades de energia ou massa) e/ou em termos monetários.

Na economia convencional, o preço de determinado produto corresponde aproximadamente ao somatório das despesas realizadas com insumos, mão de obra, transporte, outros tipos de serviços e a margem de lucro desejada. De certo modo, o preço econômico mensura o trabalho humano agregado; todavia, não considera a contribuição da natureza na formação dos insumos requeridos, tampouco o custo das externalidades negativas no sistema regional, pagas pela sociedade local.

A riqueza real dos recursos ambientais, na economia convencional, é inversamente proporcional aos custos monetários. Assim, quanto maior for o trabalho da natureza na produção de recursos, menor será seu preço, graças a sua abundância. Do mesmo modo, quando os recursos do ecossistema se tornam escassos, seus preços de mercado tendem a aumentar e, nesses casos, a pressão da demanda poderá colocar em risco a sustentabilidade do recurso (SOARES, 2019).

A metodologia emergética, apresentada pelo pesquisador Howard T. Odum, se propõe a medir todas as contribuições (moeda, massa, energia) em termos equivalentes (ou seja, a energia incorporada ou Emergia). Em outras palavras, isso significa que o trabalho da natureza deve ser reconhecido e corretamente valorizado no mercado (ODUM, 1996).

Desse modo, os valores expressos em Emergia ou dólares emergéticos (EM-Dólares) representam os verdadeiros valores dos recursos, sejam estes naturais ou antrópicos. A Emergia pode ser definida da seguinte maneira: “Emergia é a energia

disponível (exergia) de um mesmo tipo, por exemplo, energia solar equivalente, que foi previamente requerida, direta ou indiretamente, para produzir um certo produto ou serviço” (ODUM, 1996, p. 43).

Essa metodologia consiste em técnica de avaliação do 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 *et al.*, 2010).

O método aplica a Teoria de Sistemas, da Termodinâmica, da Biologia e de novos princípios do funcionamento de sistemas abertos, convertendo os recursos usados em um sistema produtivo em termos de Emergia e o modo de fazer a contabilidade em EMDólares (ODUM, 1996; PILLET, 1997).

A Emergia por unidade monetária mede a capacidade de compra de riqueza real, sendo um índice utilizado para converter os fluxos de Emergia em fluxos de EMDólares, ou seja, a emergia associada ao dinheiro, ou seu valor econômico equivalente (ORTEGA, 2002). Os cálculos permitem avaliar recursos e benefícios visando a subsidiar procedimentos para a tomada de decisões em nível de planejamento.

Nos ecossistemas naturais, todos os processos de uso, transferência, transformação e armazenagem de energia, desde os produtores até os consumidores, podem ser visualizados como fluxos energéticos e quantificados em Emergia, convertendo cada fluxo e estoque em energia solar incorporada, na medida em que passa de um estado a outro. Para isso, pesquisadores desenvolveram tabelas de Transformidade, tendo como referencial a própria energia solar (ODUM, 1989; COMAR, 2017). Esse método consiste, portanto, em técnica de avaliação do 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 *et al.*, 2010).

A metodologia emergética utiliza a energia solar incorporada (Emergia) aos recursos ambientais para expressar a contribuição da natureza na produção de insumos, matérias-primas, produtos e serviços. Desse modo, 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.

2.2 Distorções dos métodos de valoração

Os métodos de valoração disponíveis não conseguem realizar avaliação precisa dos bens ambientais em virtude de suas limitações, conforme leciona Custódio (2017). Portanto, a professora esclarece que a aplicação conjunta de vários desses métodos pode reduzir as distorções e resultar em valores mais reais.

Outro aspecto apontado por Custódio (2017) consiste no fato de que os métodos de valoração desconsideram valores religiosos, moral, afetivos e outros. O Quadro 2 apresenta, sucintamente, características dos métodos de valoração.

Quadro 2 Características dos métodos de valoração

Método	Tipo de valor	Características
Avaliação contingente	Uso direto e indireto Opção Existência	Realiza pesquisas à população para captar disposição direta da população a pagar por um bem ou serviço ambiental.
Preços hedônicos	Uso direto e indireto Opção	Estabelece relação entre os atributos de um produto e seu preço no mercado.
Custo de viagem	Uso direto e indireto Opção	Obtém a disposição adicional da população a pagar pelas visitas a um patrimônio natural a partir de uma função que relaciona a taxa de visitação ao custo de viagem (função demanda).
Dose resposta	Uso direto e indireto	Obtém o preço de um recurso a partir de uma função, relacionando o nível de provisão do recurso ambiental (dose) e o nível de provisão de um produto no mercado (resposta).
Custos evitados	Uso direto e indireto	Gastos para manter um produto constante após variação do bem ou serviço ambiental.
Custos de reposição	Uso direto e indireto	Gastos com substituto para repor perdas ambientais.
Custos de oportunidade	Uso direto e indireto	Renda sacrificada para manter bem ou serviço ambiental em seu estado atual.

Fontes: Vélez (2015); Custódio (2017).

Há, ainda, que ressaltar o Valor Econômico de Referência para o Dano Ambiental (VERD), apresentado pelo químico sanitário Artur R. Albeche Cardoso (CARDOSO, 2003), que buscava um *quantum debeatur* para indenização. Esse método, segundo Steigleder (2012), foi base para cálculo de compensação ambiental estabelecido pelo Decreto n. 6.848/2009, que se refere à compensação por significativa degradação ambiental.

Art. 31-A. O Valor da Compensação Ambiental – CA será calculado pelo produto do Grau de Impacto – GI com o Valor de Referência – VR, de acordo com a fórmula a seguir:

$$CA = VR \times GI$$

Onde:

CA = Valor da Compensação Ambiental;

VR = somatório dos investimentos necessários para implantação

do empreendimento, não incluídos os investimentos referentes aos planos, projetos e programas exigidos no procedimento de licenciamento ambiental para mitigação de impactos causados pelo empreendimento, bem como os encargos e custos incidentes sobre o financiamento do empreendimento, inclusive os relativos às garantias, e os custos com apólices e prêmios de seguros pessoais e reais; e

GI = Grau de Impacto nos ecossistemas, podendo atingir valores de 0 a 0,5% (BRASIL, 2009).

Conforme apresentado, os métodos de valoração existentes são limitados e contemplam a multidisciplinaridade das áreas de conhecimento para compreensão dos fenômenos, ultrapassando as fronteiras da economia convencional.

2.2.1 Métodos normatizados

A NBR 14.653-6:2008 (versão corrigida: 2009), da ABNT, trata de avaliação de bens – recursos naturais e ambientais. De acordo com a norma, não é possível estabelecer, a priori, a prevalência de um método de valoração de danos ambientais em relação ao outro.

Essa norma técnica apresenta alguns conceitos e referências, estabelecendo que o VERA é igual ao VU somado ao VE; $VERA = VU + VE$.

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).

Assim, o VERA compreende a soma dos valores de uso e de não uso, podendo ser expresso de acordo com a Equação 3:

$$VERA = VUD + VUI + VO + VE$$

(Equação 3)

Onde:

VUD = Valor de Uso Direto;

VUI = Valor de Uso Indireto;

VO = Valor de Opção;

VE = Valor de Existência ou Valor de Não Uso.

Há diversos métodos de valoração que objetivam obter as parcelas (VUD, VUI, VO e VE) do VERA. Cada método apresenta limitações em suas estimativas, as quais estarão quase sempre associadas ao grau de sofisticação metodológica, à necessidade e disponibilidade de dados e informação para o caso, às hipóteses

sobre comportamento dos bens envolvidos, bem como dos indivíduos e da sociedade e ao uso que será dado aos resultados obtidos.

O Decreto n. 4.339, de 22 de agosto de 2002, que institui princípios e diretrizes para a implantação da Política Nacional da Biodiversidade, também estabelece em seu Anexo (art. 2º, 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 (BRASIL, 2002).

Salienta-se que os métodos diretos utilizam mercados de bens e serviços substitutos ou complementares ou mercados hipotéticos para mensurar as variações de bem-estar, enquanto os indiretos valoram os benefícios ambientais utilizando os custos evitados, as mudanças na qualidade ambiental, serviços ecológicos e funções ambientais e outros.

Atendem à NBR 14.653-6:2008 (versão corrigida: 2009), em especial quanto aos componentes de valor comercial dos bens (8.5.1), custos de reposição (8.6.1.1), custos de realocação (8.6.1.2), e também em relação aos métodos de bens substitutos (8.6.1), quando os preços de mercado podem ser adotados com base nos bens substitutos para o produto ou o recurso natural (crédito de carbono, serviços ambientais, entre outros).

2.3 Estudo de caso – caracterização e valoração de dano à qualidade da água

2.3.1 *Caracterização dos danos – poluição dos recursos hídricos*

Serão discutidos, a seguir, os resultados dos principais parâmetros analisados nas Estações de Monitoramento do IGAM que ultrapassaram os padrões ambientais no período considerado, os quais permitem avaliar as possíveis alterações do corpo d'água, Rio Paraopeba, em função das características do rejeito e do volume de material sólido transportado pela lama.

No dia 26 de janeiro de 2019, primeiro dia após o desastre, foram observadas as maiores concentrações para os parâmetros turbidez, sólidos em suspensão totais, cor verdadeira, ferro dissolvido, manganês total, alumínio dissolvido, mercúrio total e chumbo total. De maneira geral, esses valores apresentaram redução ao longo dos dias. Contudo, ainda foram constatadas violações ao limite de classe 2 estabelecido na legislação vigente.

2.3.2 *Turbidez*

A turbidez constitui característica física da água decorrente da presença de substâncias em suspensão, ou seja, de sólidos suspensos finamente divididos, ou

em estado coloidal, e de organismos microscópicos. Esses sólidos ocasionam interferências na penetração da luz no meio aquático, conferindo uma aparência turva à água e, conseqüentemente, reduzem a zona eufótica dos cursos d'água, prejudicando o processo de fotossíntese e a sobrevivência da biota aquática (BAIRD, 2002).

A turbidez pode ser expressa por meio de Unidades de Turbidez (UNT), sendo considerada um dos principais parâmetros para a seleção da tecnologia de tratamento da água bruta e controle operacional dos processos de tratamento destinados à produção de água potável.

Na água potável, a turbidez é esteticamente desagradável e seu principal inconveniente sanitário está associado à natureza química de certos sólidos em suspensão que podem estar presentes.

Salienta-se que, em virtude do rompimento da barragem B1 e da grande quantidade de lama e de sedimentos de coloração marrom avermelhada contida nos rejeitos de minério de ferro que atingiram o Rio Paraopeba, a qualidade da água dos municípios que a captavam nesse curso d'água foi comprometida, principalmente, em virtude dos elevados índices de turbidez, impossibilitando o tratamento e acarretando, portanto, desde o dia 25 de janeiro de 2019, a total interrupção do uso desse manancial para qualquer finalidade.

2.3.3 Sólidos totais em suspensão

Os sólidos em suspensão, conforme mencionado anteriormente, podem ocasionar a turbidez das águas, dificultando a passagem dos raios solares, comprometendo a atividade fotossintética e, conseqüentemente, os serviços no ecossistema aquático. Os sólidos também contribuem para o assoreamento dos cursos d'água e podem ocasionar asfixia nos peixes por entupimento das vias respiratórias. Salienta-se que esse parâmetro constitui o poluente que mais impactou negativamente a qualidade da água do Rio Paraopeba em virtude do rompimento da barragem B1.

2.3.4 Manganês

As concentrações de manganês violaram, no período analisado, o padrão ambiental (0,1 mg/L), bem como ultrapassaram o máximo valor da série histórica de monitoramento (Projeto Águas de Minas) do Rio Paraopeba nas Estações de Monitoramento atingidas pela lama de rejeitos. Ressalta-se que esse parâmetro é um dos componentes do rejeito armazenado na barragem B1. A presença de manganês, em quantidade excessiva, é indesejável em mananciais de abastecimento público, como o Rio Paraopeba, por conferir cor e sabor às águas.

2.3.5 Chumbo total

As concentrações de chumbo total ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação vigente nos primeiros dias após o rompimento. Contudo, de acordo com os resultados obtidos no monitoramento, referentes ao dia 3 de fevereiro de 2019, os padrões ambientais se adequaram.

2.3.6 Alumínio e ferro dissolvidos

Foram constatadas violações das concentrações de alumínio e ferro dissolvidos em todas as estações no trecho entre Esmeraldas e Pompéu (estações BP082, BP083, BP078 e BP099). Entretanto, alterações desses parâmetros já eram observadas na série histórica de monitoramento do IGAM por estarem presentes na constituição do solo da região.

2.3.7 Mercúrio total

O mercúrio foi o único metal pesado detectado em 3 de fevereiro de 2019, na Estação BPE2 (Rio Paraopeba na captação da COPASA), em concentrações acima do padrão ambiental. Segundo a caracterização do rejeito da barragem B1, apresentada na documentação do licenciamento ambiental da Mina do Córrego do Feijão, o mercúrio não está presente na composição da lama e, de um modo geral, contaminações desse metal estão relacionadas à extração secular e recente do ouro, incluindo a atividade garimpeira.

2.3.8 Valoração do dano

2.3.8.1 Valor de uso direto (VUD)

O valor de uso direto consiste no valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental em função do bem-estar que ele proporciona, por meio do uso direto. Por exemplo, na forma de extração de recurso, de visitação ou outra atividade de produção ou consumo.

Em consonância com o Comunicado à Imprensa divulgado pelas Secretarias de Estado de Saúde (SES), de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD); e de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA), baseado no monitoramento de qualidade de água bruta realizada pelo Governo de Minas, após o rompimento da Barragem I (Mina do Feijão em Brumadinho), foi suspensa a captação de água para abastecimento público no Rio Paraopeba COPASA e pela empresa Águas de Pará de Minas.

Em face do exposto, pode-se dizer que, além de fundamental para a vida, a água também constitui um importante insumo econômico. Portanto, seu VUD

foi estimado com base no valor de mercado estabelecido para o benefício advindo de sua utilização, após tratamento.

Considerando as informações da COPASA e dados de projeto da concessionária Águas de Pará de Minas, o cálculo do volume diário que ficou indisponível para a população abastecida por esse manancial, em virtude da interrupção de sua captação, encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 Volume indisponível após a interrupção da captação do Rio Paraopeba

Empresa	Captação – Rio Paraopeba (L/s)	Volume indisponível (m ³ /dia)
Copasa	5.000	432.000
Águas de Pará de Minas	3.000	259.200
Total	8.000	691.200

Fonte: MPMG (2019).

Utilizando-se o valor de mercado, ou seja, a tarifa média de R\$ 5,42 por m³, referente ao serviço público de abastecimento de água, estabelecida em 2019 pela COPASA, foi obtido o VUD (Tabela 2).

Tabela 2 Valor de Uso Direto (VUD)

Empresa	Volume indisponível (m ³ /dia)	Tarifa (R\$/m ³)	Custo (R\$/dia)
Copasa	432.000	5,42	2.341.440,00
Águas de Pará de Minas	259.200	5,42	1.404.864,00
Total	691.200	-	3.746.304,00

Fonte: MPMG (2019).

Portanto, o VUD corresponde a R\$ 3.746.304,00 por dia.

2.3.8.2 Valor de Uso Indireto (VUI)

O VUI é definido como o valor atribuído a um recurso ambiental em virtude de suas funções ecossistêmicas.

Bens e serviços são oferecidos pelos ecossistemas e garantem o bem-estar de toda a sociedade. Esses serviços estão intimamente relacionados ao equilíbrio ecológico, especificamente na estrutura e funções do ecossistema, que podem ficar comprometidos pela entrada de poluentes.

Dessa maneira, os desequilíbrios ecológicos são diretamente relacionados à degradação dos serviços ecossistêmicos que, por sua vez, resultam em prejuízos a toda sociedade. São essas perdas que a sociedade tenta evitar ao estabelecer medidas de controle das emissões e ao monitorar a qualidade dos diferentes meios da

biosfera (ULGIATI; BROWN, 2002).

Assim, a avaliação dos efeitos de poluentes nos serviços ecossistêmicos corresponde a uma avaliação do desequilíbrio ecológico, que pode ser expressa em termos biofísicos (unidades de energia ou massa) e/ou em termos monetários. Neste artigo, os serviços ecossistêmicos analisados são aqueles relacionados ao lançamento dos rejeitos da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão nas águas do Rio Paraopeba.

Considerando os impactos negativos dos poluentes lançados no Rio Paraopeba, verifica-se que seus principais impactos estão relacionados ao aporte de sólidos no ambiente aquático. Portanto, no que diz respeito às interferências sobre os recursos hídricos, os serviços ecossistêmicos afetados podem ser quantificados em termos da energia necessária para a diluição dos rejeitos até o nível máximo permitido para o parâmetro SST nas águas do rio, enquadrado na classe 2.

Para fins da quantificação do dano ambiental à qualidade das águas, considerou-se o trecho do Rio Paraopeba compreendido entre o ponto onde o rejeito atingiu esse rio e o local de captação de água para abastecimento público do município de Pará de Minas, Minas Gerais.

2.3.8.3 Quantificação da carga de rejeitos (lama) que atingiu o Rio Paraopeba

Para fins da quantificação da carga poluidora que atingiu o Rio Paraopeba, considerou-se que 50% dos rejeitos atingiram o rio Paraopeba e que 50% ficaram retidos no solo⁴.

Ademais, adotaram-se para fins de cálculo:

A média das concentrações de SST apresentadas pelo IGAM no período de 25 de janeiro de 2019 a 3 de fevereiro de 2019, aferidas em nove estações de amostragem situadas a jusante do ponto onde os rejeitos atingiram o Rio Paraopeba (Quadro 1).

O limite máximo admissível de 100 mg/L para SST (águas de classe 2 – art. 14, I, 3. f – DN COPAM/CERH 01/2008).

Vazão do Rio Paraopeba: 30 m³/s (medida antes do rompimento, conforme CPRM, 2019).

Portanto, a carga diária de rejeito lançada nas águas do Rio Paraopeba foi:

$$\text{Carga diária} = \text{Concentração de SST} \times \text{Vazão}$$

$$\text{Carga diária} = 6,17\text{E}+06 \text{ kg SST/dia}$$

⁴ Área atingida pela lama: 289,80 ha

Volume de rejeitos extravasados para o ambiente: 12,7 milhões de m³

2.3.8.4 Determinação da massa de água necessária para diluição dos rejeitos que atingiram o Rio Paraopeba

A massa total de água, comprometida na diluição de SST até a concentração máxima permitida pela legislação em vigor, foi obtida por meio da Equação 4:

$$M = d \frac{W_{SST}}{c}$$

(Equação 4)

Onde:

M = massa de água

d = densidade da água (1 g/cm³)

W_{SST} = carga média de SST, lançada no Rio Paraopeba (concentração × vazão)

c = concentração máxima permitida na legislação em vigor para SST para águas classe 2

Então:

$$M = 1E+06 \text{ mg/L} [(2.381,09 \text{ mg/L} \times 2.592.000.000,00 \text{ L/dia}) / (100 \text{ mg/L})]$$

$$M = 61.717.912.615,38 \text{ kg/dia de SST}$$

$$\mathbf{M = 6,17E+10 \text{ kg/dia}}$$

2.3.8.5 Cálculo da energia potencial da massa de água

A energia potencial (Ep) da massa de água utilizada na diluição dos poluentes foi calculada, em Joules, por meio da Equação 5:

$$Ep = M \cdot g \cdot h$$

(Equação 5)

Onde:

M = massa de água para diluir os SSTs até os níveis permitidos, em kg (Equação 4)

g = aceleração da gravidade = 9,8 m/s²

h = diferença de altitude entre o ponto P1 (Altitude: 738 m) e o ponto P2 (altitude: 688 m), que corresponde a 50 metros (*Google Earth*)⁵

Então:

$$Ep = 6,17E+10 \text{ kg/dia} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 50,0 \text{ m}$$

$$\mathbf{Ep = 3,02E+13 \text{ J/dia}}$$

5 Para esse cálculo, considerou-se os pontos P1 e P2 do mapa apresentado pelo MPMG (2019). A diferença da altitude nos dois pontos forneceu o valor (h), para calcular a energia potencial necessária ao escoamento gravitacional da massa de água requisitada, a fim de diluir os SSTs até atingir o limite estabelecido pela legislação vigente (SST igual a 100,00 mg/L – classe 2). P1: ponto onde o rejeito (lama) atingiu o Rio Paraopeba, na confluência do Córrego Ferro-Carvão. P2: local de captação de água para abastecimento público do município de Pará de Minas, Minas Gerais.

2.3.8.6 Cálculo do VUI

A valoração monetária dos serviços ecossistêmicos e, portanto, o cálculo diário do VUI é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 Valoração dos serviços ecossistêmicos.

Serviços ambientais afetados	Carga total (kg/dia) ^(a)	Massa de água para diluição (kg/dia) ^(b)	Energia potencial (J/dia) ^(c)	Transformidade (Sej/J) ^(d)	Energia (Sej)	Em dólares (US\$/dia) ^(e)	Reais (R\$/dia) ^(f)
Diluição SST	6,17E+06	6,17E+10	3,02E+13	2,8E+04	8,43E+17	280.986,43	1.463.939,30

a – Carga: produto da concentração de SST e vazão do rio;

b – Equação 4;

c – Equação 5;

d – Ortega, 2000;

e – EMDólar = dólares emergéticos = energia / Transformidade

Energia-Dólar, onde: Transformidade Energia-Dólar = $3,0 \times 10^{12}$ Sej/US\$

f – US\$1,00 = R\$5,21 (câmbio – cotação em 24 de julho de 2020)

Fonte: elaborada pelos autores.

Portanto, o VUI corresponde a R\$ 1.463.939,30 por dia.

Desse modo, somando o VUD (Tabela 2) com o VUI (Tabela 3) tem-se o valor diário dos danos ocasionados ao Rio Paraopeba, desde o rompimento da barragem B1 em 25 de janeiro de 2019. Sendo assim, esse valor corresponde a R\$ 5.210.243,30 por dia.

Conclusão

Diante do exposto, para fins de valoração dos danos ocasionados à qualidade da água do Rio Paraopeba pelos rejeitos oriundos da Barragem B1, o método que emprega o cálculo emergético para determinação do VERA demonstrou-se viável.

Considerando o VUD, bem como o VUI, a valoração dos danos ocasionados à qualidade da água superficial para fins de abastecimento público, embasada em critério normatizado pela ABNT (NBR 14.653-4:2008), apresentou *quantum debeat* correspondente a R\$ 5.210.243,30 por dia. A sugestão é que esse valor diário seja acumulado até que se retomem as captações no Rio Paraopeba, para fins de abastecimento.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.653-6:2008*. Versão corrigida: 2009. Avaliação de bens: parte 6: recursos naturais e ambientais. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ARSAE-MG – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUA E ESGOTO. *Resolução ARSAE-MG 96*, de 29 de junho de 2017. Autoriza a Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa a aplicar aos serviços públicos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário prestados as tarifas constantes do Anexo I desta Resolução, aprova as regras a serem observadas pela Copasa para o próximo ciclo tarifário e dá outras providências. Belo Horizonte: ARSAE-MG, 2017. Disponível em: http://arsae.mg.gov.br/images/documentos/audiencia_publica/15/Resolucao_96_RevisaoCopasa_2017.pdf. Acesso em: 10 fev. 2019.

BAIRD, C. *Química ambiental*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. *Decreto n. 4.339, de 22 de agosto de 2002*. Institui princípios e diretrizes para a implementação da Política Nacional da Biodiversidade. Brasília, DF: Presidência da República, 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4339.htm. Acesso em: 10 fev. 2019.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. *Decreto n. 6.848, de 14 de maio de 2009*. 2009. Altera e acrescenta dispositivos ao Decreto no 4.340, de 22 de agosto de 2002, para regulamentar a compensação ambiental. Brasília, DF: Presidência da República, 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Decreto/D6848.htm. Acesso em: 22 jan. 2019.

CARDOSO, A. R. A. *A degradação ambiental e seus valores econômicos associados*. Porto Alegre: Sergio Fabris, 2003.

CHRISTÓFARO, C. Valoração de serviços ecossistêmicos afetados pelo lançamento de esgotos domésticos não tratados em cursos d'água na bacia do Rio Verde Grande-MG. *Revista do Ministério Público de Minas Gerais*, Belo Horizonte, edição especial Meio Ambiente, Jurídico Especial, p. 56-62, 2012.

COMAR, V. *Valoração ambiental pela metodologia emergética: subsídios às políticas públicas no Brasil*. Dourados: UFGD, 2017.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. *Resolução n. 357, 17 de março de 2005*. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamentos de efluentes nos corpos receptores e dá outras providências. Brasília, DF: CONAMA, 2005.

COPASA – COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS. *Comunicação Externa n. 069/2019 – DMT* enviada à CEAT/MPMG, em 8 de fevereiro de 2019, no âmbito do IC n. 0024.19.001859-8, 2019. Belo Horizonte: COPASA, 2019.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Boletim de monitoramento compartilhado do Rio Paraopeba*. Ruptura da barragem do Complexo do Feijão

em Brumadinho – MG. Documento de 06/02/2019. Figura 3 – Fluviograma das estações Ponte Nova do Paraopeba e Ponte da Taquara. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Paraopeba/20190206_19-20190206%20-%20191433.pdf. Acesso em: 8 fev. 2019.

CUSTÓDIO, M. M. *A importância da valoração econômica na proteção jurídica do meio ambiente*. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2017.

FREITAS, R.; ALMEIDA, F. Um ano após tragédia da Vale, dor e luta por justiça unem famílias de 259 mortos e 11 desaparecidos. *G1*, 25 jan. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/25/um-ano-apos-tragedia-da-vale-dor-e-luta-por-justica-unem-familias-de-259-mortos-e-11-desaparecidos.ghtml>. Acesso em: 20 jun. 2020.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Modelo de valoração econômica dos impactos ambientais em unidades de conservação*. Rio de Janeiro: Ibama, 2002. Disponível em: <http://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/modelo-de-valoracao-economica-dos-impactos-ambientais-em-unidades-de-conservacao.pdf>. Acesso em: 31 set. 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades e estados do Brasil*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Informativo Especial Avaliação da série histórica entre 2000 e 2018*. Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais. Belo Horizonte, 12 de fevereiro de 2019. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/informativos_qualidade_agua/Informativo_Especial__Serie_Hist%C3%B3rica_2000_a_2018_140219.pdf. Acesso em: 20 fev. 2019.

LIMA, L. H. *Controle do patrimônio ambiental brasileiro: a contabilidade como condição para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: UERJ. 2001.

MAGLIANO, M. M. *Valoração econômica em laudos periciais de crimes contra o meio ambiente*. Dissertação (Mestrado Profissional) – Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa conjunta COPAM/CERH n. 01, de 5 de maio de 2008*. 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. Publicação – Diário do Executivo – “Minas Gerais” – 13/05/2008.

MOTA, J. A. *et al.* A. A valoração da biodiversidade: conceitos e concepções metodológicas. In: MAY, P. H. (org.). *Economia do Meio Ambiente: teoria e prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 265-288.

MOTTA, R. S. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997. Disponível em: <http://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/manual-para-valoracao-economica-de-recursos-ambientais.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.

MOTTA, R. S. *Manual de valoração*. Brasília, DF: MMA, 1998. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/publica/mvalora/sumario.html>. Acesso em: 30 jan. 2019.

MPMG – MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *Ação Civil Pública ID 60842454*, de 31 de janeiro de 2019. Giselle Ribeiro de Oliveira. Belo Horizonte: MPMG, 2019a. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A91CFA969E237220169E4F274311EBF>. Acesso em: 24 jun. 2019.

MPMG – MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *Parecer Técnico Preliminar ID nº SGDP 2928573/SISCEAT 33652769*, de 11 de fevereiro de 2019, elaborado por Alexandra Fátima Saraiva Soares e Paula Santana Diniz. Belo Horizonte: MPMG, 2019b.

MPMS – MINISTÉRIO PÚBLICO DO MATO GROSSO DO SUL. *Nota técnica: orientações para valoração de dano ambiental em procedimentos do Ministério Público de Mato Grosso do Sul*. Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça do Meio Ambiente (CAOMA). Núcleo Ambiental. Campo Grande: MPMS, 2018.

ODUM, H. T. *Emergy and evolution*. In Preprints of the 33rd Annual Meeting of the International Society for System Sciences, Edinburgh, Scotland, v. 3. July 2-7, 1989.

ODUM, H. T. *Environmental accounting, emergy and decision making*. New York: Wiley, 1996.

ORTEGA, E. *Contabilidade e diagnóstico de sistemas usando os valores dos recursos expressos em emergia*. Campinas: UNICAMP/DEA, 2000.

PILLET, G. *Economia ecológica: introdução à economia do ambiente e dos recursos naturais*. Lisboa: Instituto Piaget, 1997.

SABATER, S.; ELOSEGI, A. Ecossistema fluvial. In: BAPTISTA, M. B.; PÁDUA, V. L. (orgs.). *Restauração de sistemas fluviais*. Barueri: Manole, 2016. p. 3-28.

SEMAD – SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Mapas de espalhamento do rejeito*. Belo Horizonte: SEMAD, 2019. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/3748-mapa-espalhamento-do-rejeito-27-de-janeiro->. Acesso em: 10 fev. 2019.

SOARES, A. F. S. *Dano aos recursos hídricos por lançamento irregular de esgoto sanitário: metodologia para valoração e compensação ambiental*. Trabalho de conclusão de curso (especialização em Direito Ambiental e Sustentabilidade) – Escola Institucional do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, em parceria com a Escola Superior Dom Helder Câmara, Belo Horizonte, 2019.

STEIGLEDER, A. M. Valoração de danos ambientais irreversíveis. *Revista do Ministério Público de Minas Gerais*, Belo Horizontem, edição especial meio ambiente, Jurídico Especial, p. 24-30, 2012.

TOLMASQUIM, M. T. *et al. Metodologias de valoração de danos ambientais causados pelo setor elétrico*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.

ULGIATI, S.; BROWN, M. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions – the case of electricity production. *Journal of Cleaner Production*, v. 10, p. 335-348, 2002.

VÉLEZ, D. F. V. Valoração econômica perante o derramamento de petróleo bruto no ambiente marinho. *Revista de Economia*, Anápolis, v. 11, n. 1, p. 174-197, 2015.