

VALORAÇÃO ECONÔMICA DE DANOS AMBIENTAIS DECORRENTES DE POLUIÇÃO

Annelise Monteiro Steigleder¹

Flávio Faccin²

Alexandra Fátima Saraiva Soares³

Paula Santana Diniz⁴

José Guilherme Roquette⁵

Sumário

1. Introdução. 2. Procedimentos prévio para qualificação da poluição. 3. Métodos aplicados para a valoração do dano decorrente de poluição. 3.1. Poluição da água. 3.1.1. Emergia. 3.1.2. Custo de reposição. 3.1.3. Mercado de Bens Substitutos. 3.2. Poluição sonora. 3.3. Poluição atmosférica. 3.3.1. Compensação das emissões de dióxido de carbono por meio de plantio de vegetação. 3.3.2. Emergia. 3.3.3. Custo de controle evitado. 3.4. Poluição do solo e da água subterrânea. 3.4.1. Custo de Remediação da Área Degradada. 3.4.2. Análise de Equivalência de Habitats. 3.5. Valoração não monetária de poluição ambiental. 4. Conclusões. 5. Referências bibliográficas.

1. Introdução

Este trabalho versa sobre métodos para valoração de danos ambientais decorrentes da poluição⁶ e atualiza o capítulo relativo à valoração econômica de

¹ Promotora de Justiça do Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul; Mestre em Direito pela UFPR; Doutora em Planejamento Urbano e Regional pelo PROPUR/UFRGS.

² Engenheiro Químico do Gabinete de Assessoramento Técnico do Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul.

³Analista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais; Engenheira Civil e Sanitarista; Bacharel em Direito; Pós-Doutora em Direito Público pela Università degli Studi di Messina, Itália. Doutora e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (DESA/UFMG).

⁴ Analista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais; Engenheira Química; Mestre em Engenharia Nuclear e Especialista em Meio Ambiente pela Universidade Federal de Minas Gerais.

⁵ Engenheiro Florestal e Analista do Ministério Público do Mato Grosso. Especialista em Economia e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Paraná. Mestre em Ciências Florestais e Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso.

⁶Integram o subgrupo poluição: Promotora de Justiça Annelise Monteiro Steigleder (coordenadora), Promotora de Justiça Cristina Graça Seixas, Procuradora da República Sandra Kishi, Procuradora de Justiça Silvia Cappelli, Economista Romana Araujo, Engenheiro José Guilherme Roquette, Engenheiro Químico Flávio Faccin, Engenheira Alexandra Fátima Saraiva Soares e Engenheira Paula Diniz.

danos decorrentes de poluição das Diretrizes para Valoração de Danos Ambientais do Conselho Nacional do Ministério Público⁷.

A metodologia adotada consistiu em colacionar uma série de experiências oriundas de pareceres e estudos técnicos elaborados para instrumentalizar perícias em inquéritos civis públicos e ações judiciais..

O dano ambiental do tipo poluição apresenta-se pluriofensivo. Tem o potencial de atingir, ao mesmo tempo, diversos componentes do meio ambiente, motivo pelo qual demanda uma abordagem complexa. O lançamento de determinado poluente na água, por exemplo, além de atingir a qualidade do corpo hídrico, afeta a biota e prejudica a satisfação de uma série de necessidades sociais, econômicas e culturais que são obtidas a partir do bem ambiental lesado.

A definição jurídica de poluição consta do art. 3º, inciso III, da Lei Federal 6938/81 (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente), segundo o qual “poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.”

Além de suscitar a incidência da responsabilidade civil ambiental, com vistas à imposição ao poluidor da obrigação de sustar a fonte poluidora, assim impedindo-se novos ilícitos e danos, independentemente da obrigação de reparação integral das diversas facetas desta forma de degradação, a poluição é tipificada criminalmente, nos termos do art. 54 da Lei Federal 9.605/98 (Lei de Crimes Ambientais e Infrações Administrativas), nos seguintes termos:

Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora.
Pena: reclusão, de 1 (um) a 4 (quatro) anos, e multa.

⁷ Disponível em <https://www.cnmp.mp.br/portal/publicacoes/14837-diretrizes-para-valoracao-de-danos-ambientais>, acesso em 07 de outubro de 2022.

Trata-se de crime de perigo em relação à saúde humana e crime de dano em relação à fauna e à flora. Sua materialidade demandará a elaboração de prova pericial, embora haja precedente do Superior Tribunal de Justiça, no sentido de que o perigo à saúde humana exigível para a configuração do delito é abstrato⁸. A perícia criminal, com valoração do dano, também é uma exigência dos arts. 19⁹ e 20¹⁰ da Lei Federal 9.605/98.

A poluição pode ser causada por diversos meios. Pode ser resultado do despejo de efluentes industriais ou domésticos na água, da infiltração de substâncias no solo, no subsolo e nas águas subterrâneas, de emissões sonoras e atmosféricas e da pulverização de agrotóxicos, a partir do que ocorre a exposição dos bens ambientais e da saúde humana a múltiplos riscos e a consumação de danos multidimensionais, que foram abordados no capítulo primeiro destas Diretrizes (danos materiais, danos interinos, também denominados de lucros cessantes ambientais ou danos intercorrentes, danos residuais, danos sociais e danos morais coletivos).

A contaminação do solo pode resultar em **danos interinos**, pelo período durante o qual perdurarem as medidas de remediação, e **danos residuais**, que expõe a perigo a saúde humana, atingem o solo e a água subterrânea permanentemente, mesmo que sejam implementados projetos de remediação. Também a poluição sonora e a poluição atmosférica oferecem complexidade em sua reparação jurídica, porquanto as medidas técnicas para regularização das atividades e a implantação de sistemas de tratamento acústico e de gases não apagam o passado, em que o bem estar humano e dos demais seres vivos foi atingido ao longo de muitos meses. Não obstante, além de danos morais coletivos, associados à perda ou à

⁸Neste sentido é o entendimento do Superior Tribunal de Justiça, conforme a seguinte ementa: "De acordo com o entendimento desta Corte Superior, "a Lei de Crimes Ambientais deve ser interpretada à luz dos princípios do desenvolvimento sustentável e da prevenção, indicando o acerto da análise que a doutrina e a jurisprudência têm conferido à parte inicial do art. 54 da Lei n. 9.605/1998, de que a mera possibilidade de causar dano à saúde humana é idônea a configurar o crime de poluição, evidenciada sua natureza formal ou, ainda, de perigo abstrato" (STJ, RHC 2.119/SP, Rel. Ministro Gurgel de Faria, 5ª. Turma, DJe 5/2/2016).

⁹Art. 19. A perícia de constatação do dano ambiental, sempre que possível, fixará o montante do prejuízo causado para efeitos de prestação de fiança e cálculo de multa.
Parágrafo único. A perícia produzida no inquérito civil ou no juízo cível poderá ser aproveitada no processo penal, instaurando-se o contraditório.

¹⁰Art. 20. A sentença penal condenatória, sempre que possível, fixará o valor mínimo para reparação dos danos causados pela infração, considerando os prejuízos sofridos pelo ofendido ou pelo meio ambiente.

Parágrafo único. Transitada em julgado a sentença condenatória, a execução poderá efetuar-se pelo valor fixado nos termos do *caput*, sem prejuízo da liquidação para apuração do dano efetivamente sofrido.

diminuição da qualidade de vida e do sossego, há danos materiais que devem ser reconhecidos e indenizados.

Nesse contexto é que as medidas de reparação por danos decorrentes da poluição deverão contemplar a indenização pecuniária por danos materiais irreversíveis, sem prejuízo do pagamento de indenização por dano moral coletivo, da execução de projetos de remediação e da implantação de equipamentos de controle que passem a impedir novos ilícitos.

Os métodos para valoração econômica de danos ambientais decorrentes de poluição devem ser combinados, de acordo com as especificidades dos diferentes bens jurídicos lesados, com vistas à captura dos diversos componentes do VERA¹¹ (Valor dos Recursos Ambientais), os quais, segundo Motta, consistem em:

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

Onde:

Valor de uso direto (VUD): valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental pelo fato de que dele se utilizam diretamente.

Valor de uso indireto (VUI): valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental quando o benefício do seu uso deriva de funções ecossistêmicas.

Valor de opção (VO): valor que os indivíduos atribuem em preservar recursos que podem estar ameaçados, para usos direto e indireto no futuro próximo.

Valor de não-uso ou valor de existência (VE): valor que está dissociado do uso e deriva de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de outras espécies que não a humana ou de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para ninguém (MOTTA, 2006).

¹¹ VERA equivale a “Valor Econômico Total” – VET.

Um evento de poluição hídrica, por exemplo, pode resultar na mortandade da fauna, na destruição da flora aquática e na produção de danos sociais, que atinjam temporária ou permanentemente as pessoas que dependem do recurso hídrico para suas atividades econômicas e práticas culturais. Tais impactos negativos atingem valores de uso direto (ex: disponibilidade de água para consumo humano, irrigação e dessedentação de animais); valores de uso indireto (ex: valor ecossistêmico do ambiente aquático para a vida silvestre); valor de opção (ex: disponibilidade hídrica no futuro) e valor de existência, reconhecendo-se a dimensão ética e ecológica da água, aspecto este que vem sendo afirmado pelas cortes de justiça de países como a Equador, Colômbia e a Índia, que contam com precedentes nos quais atribuem personalidade jurídica, respectivamente, aos rios Vilcabamba, Atrato e Ganges (CÂMARA; FERNANDES, 2018).

Diante disso, os diversos impactos negativos, decorrentes do evento de poluição, devem ser levantados por **tipologia** (impactos na saúde humana, na vegetação, na fauna, na paisagem, impactos decorrentes da emissão de ruídos, de poluentes atmosféricos ou de efluentes domésticos/industriais, perda de empregos e encerramento de atividades locais etc.), **categoria do VERA** (lesão a valor de uso direto, indireto, opção e existência); **magnitude e duração** (temporários, definitivos, etc.), a fim de que cada um deles seja objeto de uma abordagem de valoração específica, que também considere a possibilidade de restauração *in situ*, de recuperação de elementos específicos e de compensação por equivalente.

2. Procedimentos prévios para qualificação da poluição

A valoração econômica dos danos ambientais pressupõe procedimentos prévios, que permitam um correto e amplo diagnóstico do dano ocorrido, assim como dos diversos serviços ecossistêmicos que foram lesados a partir da atividade poluidora. É preciso apurar o tipo de contaminante introduzido no meio ambiente, estimar seu volume e concentração, avaliar sua toxicidade e o seu potencial de atingir a saúde humana, as atividades socioeconômicas e culturais e outros bens jurídicos protegidos, como o solo, o ar, a água, a fauna e a flora.

Para nortear esta avaliação preliminar, voltada à garantia de que os dados elementares para a valoração sejam colhidos, consoante os bens ambientais

lesados e selecionados como relevantes para a valoração, adota-se neste trabalho o Roteiro de Vistoria expedita elaborado pelo Ministério Público Federal, direcionado para a coleta de dados e para a produção de informações essenciais, de forma célere e pouco custosa¹². O objetivo é evitar a perda de informações, que tende a ocorrer pela falta de pronto registro ou de mascaramento do dano por intervenções posteriores, de causa natural, acidental ou intencional. Para esse tipo de vistoria, sugere-se sejam acionados os órgãos ambientais locais, a polícia militar e especialistas vinculados a instituições de ensino e pesquisa.

Em sequência, o mesmo roteiro do Ministério Público Federal propõe diretrizes para perícias multidisciplinares. Dada a sua relevância, transcrevemos as diretrizes que permitem a caracterização da poluição:

Quadro 1: Aspectos técnicos relacionados ao lançamento de produto tóxico no ambiente para vistoria expedita

LANÇAMENTO DE PRODUTO TÓXICO (SÓLIDO, LÍQUIDO OU GASOSO) NO AMBIENTE
Atividades mínimas e informações essenciais (Registrar todos os métodos, técnicas e duração do levantamento):
<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterização química e mineralógica, volume (m³), massa (kg) e concentração, quando couber, do material lançado no ambiente. 2. Descrição do lançamento (datas, circunstâncias, tempo decorrido até a cessação). Histórico de lançamentos, acidentais ou não, da mesma natureza na área. Evidências ou possibilidade de precipitação de contaminantes (produtos da reação do gás) na superfície do solo, águas ou vegetação. 3. Descrição da ocorrência de explosão ou queima associada ao lançamento de produto inflamável. 4. Dimensão (m²) e localização geográfica da área afetada pelo lançamento com indicação das coordenadas dos seus vértices e do sistema de referência geodésico. Descrição dos usos do solo e dos recursos hídricos anteriores

¹²Ministério Público Federal. 4ª. Câmara de Coordenação e Revisão. *Valoração de Danos em matéria de meio ambiente e de patrimônio cultural*. Roteiros para vistoria expedita e perícia multidisciplinar em procedimentos do Ministério Público Federal. Disponível em http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/publicacoes/roteiros-da-4a-ccr/copy2_of_14_006_dia_mundial_do_meio_ambiente_2_Livreto_ONLINE_CCR4_101.pdf, acesso em 16 fev. 2021.

ao lançamento.

5. Medidas, equipamentos e/ou benfeitorias de prevenção que tomadas ou aplicadas anteriormente ao lançamento, poderiam tê-lo evitado.

6. Caracterização geral da vegetação e da flora afetadas; bioma e fitofisionomias ocorrentes na área; principais usos pela população; espécies mais destacáveis; Áreas de Preservação Permanente, Reservas Legais e áreas protegidas.

7. Descrição da área coberta por vegetação contaminada. Mapa com representação dessa área. Descrição dos danos à vegetação, com estimativa do número de plantas adultas afetadas, com identificação botânica. Registro fotográfico detalhado.

8. Caracterização geral dos vertebrados terrestres e aquáticos, com identificação das espécies ou grupos de espécies mais abundantes ou frequentes, incluindo aves e peixes migratórios potencialmente presentes na ocasião do lançamento.

9. Total (exato ou estimado) de animais visivelmente afetados pela contaminação ou mortos, identificados até o menor táxon possível. Registro fotográfico detalhado.

10. Caracterização do sistema socioeconômico afetado: atividade produtiva, cadeia logística. Total estimado de pessoas afetadas pela suspensão de abastecimento de água e tempo decorrido até o reabastecimento.

11. Caracterização do impacto sobre a saúde de pessoas. Total estimado dos atendimentos médicos emergenciais, internações e óbitos decorrentes do lançamento.

12. Em caso de poluição do solo, identificação das possibilidades de uso futuro do solo com e sem remediação, mesmo que natural.

O mesmo roteiro do Ministério Público Federal sugere que, em caso de **alteração na água superficial que prejudique sua qualidade**, a torne temporária ou permanentemente inservível para uso humano ou imprópria para o suporte das condições ecológicas anteriores ao vazamento/lançamento, na vistoria expedita sejam levantadas as seguintes informações técnicas:

Quadro 2: Aspectos técnicos relacionados à alteração na água superficial para vistoria expedita

ALTERAÇÃO NA ÁGUA SUPERFICIAL

1. Características do corpo d'água impactado: área de abrangência da ocorrência, vazão ou volume, qualidade anterior e posterior ao lançamento;
2. Descrição das medidas específicas que tomadas anteriormente ao lançamento teriam evitado a degradação e os danos constatados. Estimativa dos custos de implementação dessas medidas, equipamentos e/ou benfeitorias;
3. Medidas necessárias, com estimativa de custos e de tempo, para restauração do corpo ou curso d'água para condições de uso similares às aquelas anteriores ao lançamento;
4. Verificação de eventual deposição do contaminante no leito do corpo ou curso d'água ou agregação aos sedimentos de fundo e da hipótese de risco à contaminação do recurso hídrico se esse for submetido a condições climáticas específicas. Indicação de medidas, estimativa de custos e tempo necessário para remediação do leito do corpo ou curso d'água;
5. Alteração na água subterrânea que prejudique sua qualidade, a torne temporária ou permanentemente inservível para uso humano ou imprópria para o suporte das condições ecológicas anteriores ao vazamento/derrame/lançamento;
6. Caracterização do aquífero antes e após a contaminação: tipo de aquífero, descrição do meio geológico que armazena a água, porosidade, vazão específica, condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento, nível potenciométrico, qualidade da água e usos da água;
7. Caracterização da dispersão do contaminante no aquífero, quer seja o próprio sólido lançado ou percolado oriundo dele. Área de abrangência e profundidade da pluma versus tempo decorrido desde o lançamento;
8. Descrição das medidas específicas que tomadas anteriormente ao lançamento teriam evitado a degradação e os danos constatados;
9. Estimativa dos custos de implementação dessas medidas, detalhando equipamentos e/ou benfeitorias;
10. Medidas necessárias, com estimativa de custos e de tempo, para restauração do aquífero para condições de uso similares às aquelas anteriores ao lançamento.

Outro referencial que pode ser de grande utilidade para a orientação a respeito das informações necessárias à utilização dos métodos de valoração é o Roteiro para laudos da Unidade de Assessoramento Ambiental do Gabinete de Assessoramento Técnico do Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul – UAA/GAT/MPRS, que, dentre os diversos tipos de danos ambientais, recomenda que,

para situações de poluição industrial, lançamento de efluentes, emissões e contaminação por resíduos sólidos, o membro do Ministério Público, no inquérito civil público, diligencie para apurar as seguintes informações:

Quadro 3 - Roteiro para Laudos Periciais – GAT/MP-RS

ATIVIDADE INDUSTRIAL - LANÇAMENTO DE EFLUENTES
<ol style="list-style-type: none">1. Informar se a empresa possui licença de operação (anexar cópia);2. Informar o ramo de atividade da empresa e, se possível, a sua capacidade de produção ou apresentar licença de operação);3. Informar se a empresa possui estação de tratamento de efluentes e, se possível, listar os principais equipamentos;4. Informar se existem reclamações da população das vizinhanças quanto ao odor, dores de cabeça, reações alérgicas ou mal estar generalizado, em decorrência do lançamento do efluente nas proximidades;5. Caso tenha sido verificado ou reclamado, informar a respeito da ocorrência de vazamentos e deficiência de impermeabilização de piso e lagoas;6. Se possível, solicitar os laudos analíticos de monitoramento do efluente líquido, bem como os registros da vazão de lançamento de efluentes praticada, preferentemente referentes aos últimos 3 meses de operação;7. Se possível, informar qual é o corpo receptor do efluente (arroio, rio, lagoa, água subterrânea, etc.) e o seu aspecto no ponto em que recebe o efluente (cor, odor, espumas e materiais flutuantes);8. Se possível, informar se, próximo ao local de lançamento de efluente, existem moradores residentes no entorno e atividades agropecuárias.
ATIVIDADES INDUSTRIAIS – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS
<ol style="list-style-type: none">1. Informar se a empresa possui licença (anexar cópia);2. Informar se há emissão visível de fumaça escura e, se possível, fotografar;3. Informar se a atividade gera odores fora dos limites de sua propriedade;4. Informar se há lançamento de “poeira” e/ou acúmulo de material particulado fora dos limites da propriedade onde se situa a atividade;5. Informar se existem reclamações da população das vizinhanças quanto ao odor, excesso de “poeira”, dores de cabeça, reações alérgicas ou mal estar generalizado, em decorrência das emissões atmosféricas;

6. Se possível, solicitar os laudos analíticos de monitoramento das emissões atmosféricas, preferentemente referentes aos últimos 2 anos de operação.

Atividades Industriais – Resíduos Sólidos

1. Informar se a empresa possui aterro para disposição de seus resíduos sólidos industriais. Em caso positivo, verificar se existe licença de operação para a atividade (anexar cópia);
2. Caso a empresa realize a disposição de seus resíduos em sua propriedade industrial, informar se esta disposição se dá a céu aberto e, se possível, se existem deficiências de impermeabilização de pisos, células e lagoas;
3. Caso a empresa realize a disposição de seus resíduos em outro local, informar os locais de destino e, se possível, solicitar as notas fiscais de transporte e/ou compra e venda de resíduos;
4. Existindo disposição de resíduos na propriedade industrial, solicitar, se possível, a apresentação dos laudos analíticos de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas do local;
5. Se possível, Informar quanto à presença de corpo d'água e/ou poço de abastecimento de água nas proximidades, moradores residentes no entorno e atividades agropecuárias (criações de animais e/ou culturas agrícolas);
6. Se possível, Informar se existem reclamações da população das vizinhanças quanto ao odor, dores de cabeça, reações alérgicas ou mal estar generalizado, em decorrência da disposição de resíduos nas proximidades.

DERRAMAMENTO DE PRODUTOS QUÍMICOS

1. Informar, o mais detalhadamente possível, as características do produto derramado, através, por exemplo, das informações contidas em rótulos de embalagens, informações prestadas por técnicos responsáveis, fichas de segurança (FISP), etc. É recomendável que estas informações compreendam o n° ONU, nome técnico e/ou comercial, fabricante, classe e subclasse de transporte (Resolução ANTT n°420/04);
2. Informar se existe licença de operação para o transporte da carga;
3. Informar os principais ingredientes que contribuem para a periculosidade do produto transportado;
4. Informar os dados da transportadora e do responsável técnico pelo transporte de produtos perigosos;
5. Informar sobre a classificação da zona onde ocorreu o derramamento (residencial, industrial, mista ou rural);

6. Informar sobre a proximidade a corpos hídricos (rios, lagos, arroios);
7. Se possível, descrever as características do produto derramado (cor, odor, aspecto oleoso, produção de fumaça, etc.);
8. Se possível, estimar a quantidade derramada de cada produto e a área atingida;
9. Se possível, informar se o derramamento atingiu solo e/ou corpos d'água;
10. Se possível, informar se houve mortandade de peixes e animais, algum efeito prejudicial visível à fauna e/ou flora, mudança de coloração da água, etc;
11. Se possível, coletar amostras de água ou solicitar à PATRAM¹³ que colete estas amostras para análise posterior;
12. Se possível informar se foram identificados efeitos adversos à saúde humana em consequência ao derramamento.

Fonte: Gabinete de Assessoramento Técnico – MP/RS

Para **contaminação de solo, subsolo e das águas subterrâneas**, sugere-se seja exigida do empreendedor uma investigação ambiental confirmatória, com anuência e regramentos disciplinados pelo órgão ambiental competente, em conformidade com as diretrizes da Resolução CONAMA 420/2009, a partir da qual será possível estimar a pluma de contaminação, os riscos envolvidos para saúde humana e para o meio ambiente e as medidas necessárias para remediação da área para o uso futuro pretendido¹⁴.

Nesta etapa de caracterização da degradação ambiental decorrente da poluição, é importante descrever as medidas que deveriam ter sido tomadas para evitar o lançamento de produto tóxico no ar, solo ou na água, se acidental, e estimar os custos de implementação dessas medidas, detalhando equipamentos e/ou benfeitorias. Ainda, é recomendável estimar o tempo necessário para a remediação, pois estes procedimentos prévios permitirão informações para o emprego das metodologias prescritas na NBR 14.653 da ABNT, de **custos de controle evitados e custos de reposição/restauração**.

Na hipótese de poluição sonora, além das medições de ruídos necessárias à caracterização da desconformidade com os limites máximos de emissão, é recomendável estimar custos envolvidos na execução de tratamento acústico da fonte poluidora, assim como os custos associados à regularização

¹³ Brigada Militar com atuação na área ambiental.

¹⁴ Alguns Estados, como São Paulo, possuem legislação própria sobre gestão de áreas contaminadas (Lei Estadual 13.577/2009), que também prescrevem as abordagens para investigação de passivos.

ambiental da atividade (custos evitados com a obtenção do licenciamento ambiental e com a execução do isolamento acústico). A mesma racionalidade é aplicável à poluição atmosférica. São casos em que se poderá lançar mão, para a valoração dos danos materiais irreversíveis, da metodologia dos **custos de controle evitados**, em que se deverá utilizar uma taxa de juros **para cálculo dos lucros cessantes ambientais (danos interinos)**.

3. Métodos aplicados para a valoração do dano decorrente de poluição

A seguir, trataremos de métodos e critérios utilizados nos laudos de assessorias técnicas dos Ministérios Públicos dos Estados e da União examinados a partir do envio à Comissão de Meio Ambiente do CNMP, considerando-se algumas tipologias de poluição. Estes métodos poderão ser conjugados, a depender dos bens ambientais lesados e das informações disponíveis, e não são exaustivos.

3.1. Poluição da água

3.1.1. Emergia

Soares, Diniz e Silva adotaram o método da Emergia, descrito no capítulo primeiro, para estimativa do valor monetário dos serviços ambientais afetados por um evento de poluição aos recursos hídricos do Rio Paraopeba, decorrentes da ruptura da barragem de rejeitos da empresa Vale S.A., localizada em Brumadinho (2020).

A emergia do serviço ambiental e seu respectivo valor monetário foram quantificados, inicialmente, por meio da estimativa das emissões 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 Classe 2, na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de maio de 2008 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 emergia potencial (serviço ecossistêmico), em Joule (J)/dia, associada ao escoamento gravitacional da

massa de água durante a diluição do poluente (sólidos em suspensão totais), 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 e são 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). Este 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.

O mesmo método foi utilizado por Soares em estudo de caso sobre a valoração do dano ocasionado pelo lançamento de esgotos sanitários *in natura*, gerados em Divinópolis/MG no Rio Itapeçerica e aferição da correspondente compensação ambiental (2020). Nesse caso, considerou-se a carga poluidora de matéria orgânica biodegradável, expressa em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), lançada indevidamente no curso de água. Para determinar o ponto de depuração da matéria orgânica no corpo de água e aplicar a equação para calcular a energia da massa de água utilizada na diluição do poluente, utilizou-se o modelo de Streeter-Phelps (SOARES, 2021).

O modelo matemático de Streeter-Phelps relaciona os principais mecanismos que definem a concentração de oxigênio dissolvido em um curso de água superficial que recebe lançamento de esgotos sanitários: decomposição de matéria orgânica e aeração.

A hipótese básica do modelo Streeter-Phelps é que a taxa de decomposição da matéria orgânica no meio aquático (ou taxa de desoxigenação dL/dt) é proporcional à concentração da matéria orgânica presente em um dado instante de tempo, que é dada pela Equação 1:

$$\frac{dL}{dt} = -k_1L \quad \text{Equação 1}$$

Onde L é a DBO remanescente ao fim do tempo t, em mg/L e k₁ é o coeficiente de decaimento, ou constante de desoxigenação, dada por dia⁻¹ e t é o tempo, em dias.

Na literatura, o coeficiente de desoxigenação (k₁) é também denominado coeficiente de decomposição (k_d). Integrando a Equação 1, entre L₀ e L, tem-se:

$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = -k_1L \rightarrow L = L_0e^{-k_1t} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: L₀ é a DBO inicial de mistura (esgoto sanitário + corpo de água receptor), no ponto de lançamento, em mg/L.

Em termos de consumo de oxigênio, é importante a quantificação da DBO exercida, que pode ser obtida pela Equação 3:

$$y = L_0 (1 - e^{-k_1t}) \quad \text{Equação 3}$$

y é a DBO exercida em um tempo t (mg/L).

Cálculo monetário dos serviços afetados

A metodologia utilizou a formulação do VERA (NBR 14.653-6:2008). O lançamento dos esgotos *in natura* de Divinópolis/MG afetou trecho do Rio Itapeçerica e posteriormente do Rio Pará. Para o cálculo da valoração, foram utilizados o Valor de Uso Direto – VUD e o Valor de Uso Indireto – VUI dos recursos hídricos afetados.

A carga de DBO foi obtida pela Equação 8:

$$\text{Carga DBO} = \text{População} \times \text{Carga per capita} \times \% \text{ esgoto não tratado} \quad \text{Equação 8}$$

O VUD foi estimado com base no valor de mercado estabelecido para o benefício advindo da utilização das águas do Rio Itapecerica e Rio Pará para diluição dos esgotos sanitários lançados em seus cursos.

Tendo em vista que o recurso hídrico constitui importante insumo econômico, foi calculado, inicialmente, com base nas informações dos valores dos Preços Públicos Unitários (PPU) apresentado no Anexo II (Tabela I) da Deliberação Normativa do Comitê da Bacia do Rio Pará nº 24/2013 para lançamento de efluentes (PPU_{DBO} – R\$/Kg) e cálculo da carga poluidora (DBO) proveniente do esgoto lançado nos cursos dos rios Itapecerica e Pará (CBHRP, 2013). Assim, VDU é calculado pela Equação 9:

$$\text{VDU} = \text{PPU}_{\text{DBO}} \times \text{carga de DBO kg} \quad \text{Equação 9}$$

Cálculo do VUI

O valor monetário dos serviços ambientais, afetados pelo lançamento dos esgotos sanitários *in natura* nos rios Itapecerica e Pará, foi obtido pela metodologia Emergética ou Ecoenergética, que utiliza a energia solar incorporada (Emergia) aos recursos ambientais para expressar a contribuição da natureza na produção da massa de água necessária para diluição dos efluentes.

Assim, para a determinação do Valor de Uso Indireto – VUI foi analisado o serviço ambiental associado a água superficial poluída.

A emergia do serviço ambiental e seu respectivo valor monetário foram quantificados, inicialmente, por meio da estimativa do lançamento nas águas de matéria orgânica biodegradável, expressa por DBO, em kg/dia, presente nos esgotos brutos. Em seguida, foi determinada a massa de água, em kg/dia, necessária para a diluição do parâmetro DBO até os padrões de referência, estabelecidos para as classes dos Rios Itapecerica e Rio Pará, na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 1, de 05 de maio de 2008 e Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento (CONAMA, 2005; MINAS GERAIS, 2008).

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 (DBO), 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, 2000a).

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 atualizado.

Considerando as características dos poluentes lançados, verificou-se que seus principais impactos estão relacionados ao lançamento de matéria orgânica no curso d'água, expresso na forma da concentração do parâmetro DBO.

Dessa forma, no que concerne às interferências sobre os recursos hídricos, os serviços ecossistêmicos afetados podem ser quantificados em termos da energia necessária para a diluição dos efluentes até os níveis máximos permitidos e pelo consumo do oxigênio dissolvido em suas águas, devido à decomposição da matéria orgânica. A avaliação dos serviços ecossistêmicos afetados foi realizada seguindo os seguintes passos:

1. quantificação da carga de DBO introduzida no meio aquático,
2. determinação da massa de água necessária para diluição das emissões calculadas até as concentrações máximas admissíveis na legislação em vigor,
3. cálculo da energia associada à massa de água necessária para diluição do parâmetro crítico até os padrões estabelecidos na legislação,

4. estimativa do oxigênio aquático dissolvido consumido pela decomposição da matéria orgânica lançada pela população de Divinópolis no curso d'água, para definir as zonas de Recuperação e Águas Limpas.

Determinação da massa de água necessária para diluição das emissões

A massa total de água comprometida na diluição da carga de DBO lançada, até a concentração de DBO permitida pela legislação, foi obtida por meio da Equação 10:

$$M = d \frac{W_{DBO5}}{c}$$

Equação 10

Onde,

M = massa de água, em kg;

d = densidade da água (1 kg/L);

W_{DBO5} = carga emitida de DBO em kg;

c = concentração de DBO no rio a montante do lançamento, em kg/L.

Cálculo da energia potencial da massa de água

A energia potencial (E_p) da massa de água utilizada na diluição dos poluentes foi calculada, em Joules, por meio da Equação 11:

$$E_p = Mgh$$

Equação 11

Onde,

M = massa de água para diluir a DBO até os níveis permitidos, em kg (Equação 10),

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

h = diferença de altitude entre o ponto de lançamento e o ponto de depuração obtido pelo modelo de Streeter-Phelps..

Cálculo da Emergia

De acordo com Ortega (2000), a transformidade referente a Rios - Escoamento gravitacional é 27.874 sej/J. Assim, a conversão da energia potencial calculada para Emergia é dada por:

$$\text{Emergia (Sej)} = E_p \times 27.874 \text{ sej/J}$$

Conversão Emergia-Dólar

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

$$EMDólar = \frac{\text{Emergia}}{\text{Transformidade Emergia - Dólar}}$$

Diante do exposto, a emergia dos serviços ecossistêmicos afetados (capacidade de autodepuração do corpo d'água) e seu respectivo valor monetário foi calculado 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 e iii) conversão do valor em dólar para Real, utilizando o câmbio atual.

3.1.2. Custo de reposição

Para poluição hídrica, a Nota Técnica sobre Valoração de Danos Ambientais do Ministério Público do Mato Grosso do Sul propõe a adoção do método do **custo de reposição**, com base em preços de mercado para reposição ou restauração do bem ambiental¹⁵. Trata-se de um método indicado pela NBR 14.653-6 da ABNT como capaz de “estimar os gastos necessários para restaurar a capacidade produtiva e as funções ecossistêmicas de um recurso ambiental degradado”¹⁶.

Este método também é citado por Valle, no contexto de um estudo publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), ao lado de outras abordagens combinadas (2006), e foi adotado em pareceres técnicos do Ministério Público do Estado do Rio de Janeiro para estimar o custo de restauração de solo e água contaminados¹⁷.

O enfoque do método de custo de reposição é aferir o custo de tratamento da água do curso hídrico onde ocorreu o dano por lançamento de efluentes domésticos ou industriais para que suas águas possam atender aos limites dos parâmetros presentes na legislação ambiental de enquadramento.

O método compara a concentração dos parâmetros escolhidos a montante e a jusante do local de lançamento irregular de efluentes no curso hídrico, valendo-se dos padrões normativos estabelecidos nas Resoluções nº 357/2005 e 430/2011, ambas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e na legislação estadual que trata da classificação dos recursos hídricos.

Os parâmetros selecionados na Nota Técnica acima mencionada como os mais representativos para inferir os possíveis prejuízos causados aos serviços ambientais foram: demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), coliformes termotolerantes, fósforo total e nitrogênio amoniacal. A escolha desses parâmetros se deve ao fato de representarem as principais variáveis monitoradas em Estações de

¹⁵ Um estudo de caso com a utilização do método consta de <https://www.mpms.mp.br/downloads/assecom/metodologia-valoracao-parte-ii.pdf>, acesso em 03 de maio de 2021.

¹⁶ A ABNT prescreve que se estimem os custos de reposição do ambiente degradado (gastos de engenharia, implementação e monitoramento) para esta reposição, incluindo a perda econômica relativa ao período entre o tempo inicial da degradação e o tempo total da recuperação.

¹⁷ MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. INFORMAÇÃO TÉCNICA 502/2019.

Tratamento de Efluentes (ETEs) e também por serem requisitadas nas licenças ambientais dos empreendimentos que lançam efluentes nos cursos hídricos¹⁸. Além das concentrações de entrada e saída dos parâmetros selecionados, é preciso aferir o custo unitário de remoção de cada parâmetro por sistema de tratamento escolhido, e verificar sua eficiência, a vazão do curso hídrico, a carga poluente e o tempo de operação da fonte poluidora.

Para o emprego deste método de valoração, ainda é necessário saber a classe de enquadramento do curso hídrico, pois foi adaptado na equação-base o respectivo coeficiente de enquadramento (Ce). Nos casos comprovados de perecimento de espécimes, será aplicado também o coeficiente de perecimento (Cp).

Com base nestas informações, aplica-se a fórmula abaixo:

$$V = n.K.t.Ce.C$$

Em que:

V = valor do dano ambiental causado pelo lançamento irregular de efluentes em curso hídrico (R\$);

n = número de ciclos de tratamento;

R = custo de tratamento para remoção da carga poluente (R\$/kg);

K = carga poluente (kg/mês);

t = tempo de operação da fonte poluidora (mês);

Ce = coeficiente de enquadramento;

Cp = coeficiente de perecimento

Fonte: MPMS¹⁹

A variável de ciclos de tratamento (n) é determinada de acordo com a eficiência de remoção de cada poluente, conforme o tipo de tratamento utilizado. O coeficiente representa o número de ciclos de tratamento necessários para a redução da concentração do parâmetro em questão até o limite previsto na legislação ambiental. Dessa maneira, concentrações elevadas de poluentes terão o valor do dano aumentado em função do número de vezes que seria necessário submeter o

¹⁸Esta afirmação consta da proposição inserida na Nota Técnica do Ministério Público do Mato Grosso do Sul, disponível em: <https://www.mpms.mp.br/downloads/assecom/metodologia-valoracao-parte-ii.pdf>, acesso em 03 de maio de 2021. É possível a utilização de outros parâmetros, conforme previsão em legislação federal e estadual.

¹⁹ <https://www.mpms.mp.br/downloads/assecom/metodologia-valoracao-parte-ii.pdf>, acesso em 03 de maio de 2021.

curso d'água em estudo ao tratamento, até atingir as condições necessárias ao enquadramento vigente.

A variável R , correspondente ao custo de tratamento para a carga do poluente, é determinada em unidade de massa (R\$/kg). A obtenção desse valor relaciona-se ao sistema de tratamento usado como referência. Na Nota Técnica do MPMS, indica-se a utilização do sistema anaeróbio, sob a justificativa de que a maioria das Estações de Tratamento de Efluentes no Estado do Mato Grosso do Sul usa este sistema. Nesse documento, consta que o valor da variável R foi obtido, multiplicando-se o valor da tarifa para efluentes industriais com volume de tratamento acima de 10 m³ pelo volume de efluente que contém 1 kg do poluente em questão.

A variável da carga poluente (K) é determinada multiplicando-se a vazão do curso hídrico pela concentração de poluente. Assim, após o ajuste devido de unidades, obtém-se o valor da massa total (kg/mês) que flui na unidade de tempo para cada poluente analisado. Como os valores de vazão no curso hídrico sofrem grande variabilidade, deve-se adotar como base de cálculo o valor da vazão de referência da bacia hidrográfica. De forma alternativa, não sendo possível a determinação do valor de referência, utiliza-se o valor mínimo de vazão encontrado nos boletins de monitoramento.

Em relação à concentração de poluentes, utiliza-se o valor médio das concentrações por meio dos boletins de monitoramento. Em casos específicos, na ausência de dados de monitoramento, deve-se utilizar os valores determinados *in loco*, no momento da vistoria técnica, tanto para vazão quanto para concentração de poluentes.

A variável t corresponde ao Tempo de operação da fonte poluidora, ou seja, ao número de meses em que o empreendimento lançou efluentes de forma irregular no curso hídrico.

O coeficiente de enquadramento (C_e) é determinado conforme a classificação do curso hídrico no local de lançamento do efluente por parte do órgão estadual competente.

Por fim, o coeficiente de perecimento (C_p) deve ser empregado nos casos em que houver perecimento de espécies no curso hídrico, constatado no

momento da vistoria ou em momento anterior por meio da análise de vestígios e provas. Se houver perecimento de espécies em risco de extinção, o valor do coeficiente deve ser de 1,10. Nos casos de perecimento de demais espécies, o valor a ser utilizado é de 1,05.

3.1.3. Mercado de Bens Substitutos

O método do mercado de bens substitutos também pode ser utilizado para contaminação hídrica, conforme se depreende de pareceres do Gabinete de Assessoramento Técnico do Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul. Em um deles, em que se analisou um caso de contaminação de solo e de lençol freático por hidrocarbonetos derivados de petróleo, associados ao funcionamento de um posto de combustíveis, a água subterrânea degradada foi considerada como a unidade de análise a ser reposta por outro bem ou serviço substituto²⁰. Ainda, foi considerado o procedimento de remediação como serviço de reposição do bem ambiental, que contemplou custos de operação, tais como gastos com o consumo energético, que são calculados e atribuídos ao valor econômico ambiental.

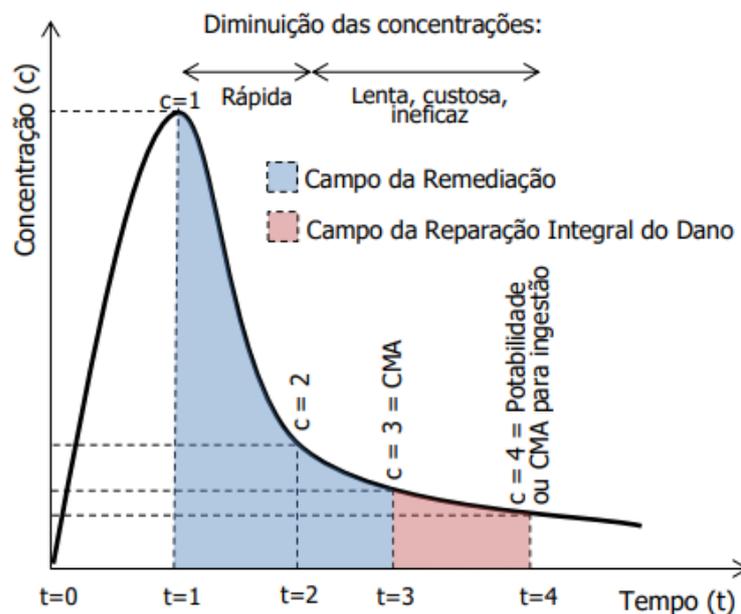
Também no âmbito do Ministério Público de São Paulo, há casos de utilização do método do mercado de bens substitutos para valoração do custo unitário do metro cúbico de água subterrânea impactada por um evento de contaminação do solo, em combinação com outros métodos²¹. O órgão ambiental do Estado de São Paulo, identificou a presença de solventes clorados (cloroetenos), como tetracloroetano (PCE), tricloroetano (TCE), dicloroetano (DCE) e cloreto de vinila (CV), além de solvente aromático (benzeno) e metais, que contaminaram o solo e o aquífero freático (porções rasa e intermediária), formando plumas que, inclusive, extrapolaram a propriedade da empresa e atingiram a área externa. No parecer elaborado para instruir a ação civil pública, considerou-se que o impacto sobre a água subterrânea seria irreversível e deveria ser mensurado economicamente. A valoração serviria para

²⁰MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Unidade de Assessoramento Ambiental. Gabinete de Assessoramento Técnico. Documento DAT-MA 0360/2010. Na mesma linha é o Documento DAT-MA 0024/2007.

²¹MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SEI nº 29.0001.0018820.2018-51 Parecer Técnico nº 459251 Ação Civil Pública nº 1097053-96.2016.8.26.0100 da 11ª Vara de Fazenda Pública. O parecer adota o Método de Valoração dos Recursos Hídricos Subterrâneos Impactados por Atividades Contaminante do projeto de pesquisa CEPAS-USP.

o cálculo de indenização à sociedade pelo período em que ela ficou privada do uso do recurso (entre $t=0$ e $t=4$), conforme Figura 1:

Figura 1. Comportamento genérico das concentrações de contaminantes na água subterrânea antes, durante e após a execução de medidas de remediação. (Fonte: CEPAS/IGc/USP)



Fonte: MP/SP

O referido parecer técnico adotou como premissas que:

“O volume de água subterrânea a ser valorado corresponde àquele associado ao impacto passado (entre os momentos $t=0$ e $t=1$), mais o remanescente de contaminação, que permanece após a remediação (impacto futuro entre os momentos $t=3$ e $t=4$), até que os limites de potabilidade sejam atingidos pelo efeito dos serviços ambientais de atenuação natural.

O impacto passado é medido pelo volume de água contido na pluma de contaminação determinada pela investigação detalhada realizada no processo de gerenciamento ambiental da área contaminada.

A quantificação do impacto futuro depende da mensuração do volume de água que atravessa o trecho contaminado do aquífero durante o período entre $t=3$ e $t=4$, o que é possível calcular através de equações analíticas e sabendo-se a taxa de degradação dos contaminantes.

Complementarmente, um volume de aquífero não impactado ao redor da pluma de contaminantes também deve ser quantificado e valorado, pois a eventual utilização da água subterrânea nestes arredores poderá resultar na propagação mais acelerada e espalhamento indesejado dessa pluma. Desta forma, a opção de utilização do aquífero será inviabilizada”.

O custo unitário do metro cúbico de água subterrânea, necessário para integrar as fórmulas adotadas no parecer, comparou o valor correspondente à substituição da água por aquela fornecida por uma concessionária pública e o valor equivalente aos custos de extração de água subterrânea de aquíferos por intermédio de poços de produção.

Também o Ministério Público do Estado do Rio de Janeiro, em um parecer de valoração econômica de danos decorrentes de contaminação do solo e da água subterrânea, aplicou o método do mercado de bens substitutos em conjunto com a identificação do custo de reposição. O laudo considerou que

“a água disponibilizada pela rede de abastecimento do município é o produto substituto da água subterrânea contaminada. Assim, a tarifa da água canalizada fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Volta Redonda/RJ é uma aproximação válida para o valor da água subterrânea. A medida de equivalência entre a água subterrânea e o seu produto substituto (água canalizada) será estabelecida com base no volume de água da reserva permanente indisponível”²².

Resumidamente, cumpre salientar que os aspectos considerados relevantes para mensurar o volume foram: (i) área total da empresa; (ii) espessura da camada aquífera contaminada; (iii) volume da pluma de contaminação de manganês; (iv) somatório das plumas de contaminação que representam risco a saúde humana e ao corpo hídrico superficial (Rio Paraíba do Sul).

Adotou-se a seguinte fórmula para o cálculo do valor econômico do dano ambiental:

²²MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Informação Técnica nº 502/2019.

$$VD = V \times P$$

Onde:

V = Volume de água da reserva permanente de água subterrânea (m³)

P = Tarifa da água canalizada

A reserva permanente corresponde ao volume de água subterrânea situada na porção saturada, abaixo da posição mínima da variação sazonal do aquífero (volume de saturação). Como o aquífero granular local é de caráter livre, o cálculo da reserva permanente é dado pelo volume de saturação²³, definido por:

$$V = A.b.\eta_e$$

Onde:

V = Volume de água da reserva permanente de água subterrânea (m³)

A = área de ocorrência do aquífero (m²)

b = espessura média saturada do aquífero (m)

η_e = porosidade efetiva

Por fim, cumpre colacionar a possibilidade de conjugação do método do mercado de bens substitutos com o método do custo de controle evitado. Nessa linha foi o Parecer do Centro de Apoio Operacional à Execução do Ministério Público do Estado de São Paulo, em um caso relacionado à valoração dos danos intercorrentes (danos interinos) causados ao meio ambiente devido ao lançamento de esgoto no mar

²³No caso aqui colacionado, não foi possível determinar exatamente as áreas impactadas por manganês em função da ausência de parâmetros nos cenários de risco modelados, onde se considera apenas a largura do eixo da maior pluma de fase dissolvida. Desta forma, foram adotados dois cenários possíveis de cálculo da reserva de volume de saturação proibidas para o consumo, considerando os dados físico-químicos e hidrogeológicos obtidos dos modelos de risco à saúde humana da CETESB, sendo estes: • Cenário A: considerou-se que a restrição de uso da reserva permanente ocorrerá por toda a área total da empresa até a profundidade de 4,56 metros (aquífero raso); • Cenário B: considerou-se que a restrição de uso da reserva permanente ocorrerá somente na área total das Unidades de Exposição (UE) nas respectivas profundidades inferidas pelo modelo de avaliação de risco à saúde humana para o composto manganês. O valor do dano foi considerado para os dois cenários e o parecer destaca que, por falta de dados, não quantificou a perda a serviços ecossistêmicos que foram atingidos.

pelo sistema de emissário submarino da SABESP de Praia Grande, sem qualquer redução de carga orgânica²⁴.

O parecer calculou os custos evitados pela SABESP, associados à falta de operação ao longo dos anos de estações necessárias para o tratamento de todo o esgoto produzido pela população da cidade de Praia Grande, no período compreendido entre 1976 e 2014. Com base em referência bibliográfica, foi apurado o custo do metro cúbico tratado na ETE Barueri no ano de 1997 (R\$ 0,094 em 1997) e foi considerado o valor atualizado de R\$ 0,39/m³, para o ano de 2015. Quanto à geração de esgoto nos municípios, assumiu-se como premissa que esta deve corresponder a cerca de 80% da água servida à população, estimada em 160 litros/habitante/dia.

Em complemento, foi aplicada a taxa financeira de 6% ao ano até 2002 e de 12% a partir 2003, excluindo-se dos cálculos os custos de implantação do sistema completo de coleta e de tratamento. Ao final, o parecer concluiu que os danos ambientais intercorrentes para o período de 1976 a 2014, correspondentes ao tempo em que o corpo d'água, em decorrência do lançamento de esgotos sem tratamento adequado, deixou de prestar os serviços ecossistêmicos, correspondem a um total R\$ 332.180.833,30 (trezentos e trinta e dois milhões, cento e oitenta mil e oitocentos e trinta e três reais e trinta centavos).

3.1.4 Método de custos de controle evitados

Na valoração do dano ambiental referente ao lançamento dos efluentes não tratados e provenientes do processamento de leite de indústria de laticínio em Minas Gerais, Soares e Silva (2020) aplicaram a metodologia apresentada na ABNT NBR 14.653-6/2008 item 8.6.1.4 - custos de controle evitados. Esse método aplica-se na valoração de danos aos recursos hídricos ocasionados por lançamento de esgotos sanitários e efluentes líquidos industriais.

Conforme consta na norma técnica supracitada, essa metodologia não considera diretamente a perda econômica ambiental, vez que assume que os custos evitados consistem em estimativa mínima da perda de bem-estar da coletividade associada ao dano.

²⁴MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Centro de Apoio Operacional à Execução. Inquérito Civil 25/2008. Parecer LT 1809/15 CAEX, datado de 27 nov. 2015.

No caso concreto, constatou-se lançamento irregular de efluentes líquidos em corpo de água enquadrado na Classe 2. Esses efluentes apresentavam concentrações superiores aos limites estabelecidos na legislação mineira pertinente (DN CERH/COPAM nº 01/2008) para os parâmetros “substâncias tensoativas”, “sólidos suspensos” e “Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)”.

O dano ambiental em questão foi ocasionado, no período de 12 de junho de 2014 a 19 de dezembro de 2018 (totalizando 1.651 dias de irregularidade).

Na quantificação do dano ambiental foram considerados valores de carga específica de DBO dos efluentes líquidos gerados no processo produtivo.

A capacidade do laticínio em questão é para processar 20 mil litros de leite por dia, na produção de queijos e iogurtes e recepcionar e refrigerar 10 mil litros de leite por dia.

Para quantificar a carga orgânica poluidora devido à “Produção de queijos e iogurtes”, utilizou-se a carga média específica de DBO de 5,8 kg/m³ leite processado, indicada para “laticínios em geral” por Cetesb (1990) e Machado *et. al* (2002). Logo, a carga poluidora para os 20 mil litros de leite processado foi de 116 kg DBO/dia.

Já na quantificação da carga orgânica poluidora advinda da “Recepção e refrigeração do leite”, adotou-se a carga média específica de 0,8325 kg de DBO/m³ de leite processado. Logo, a carga poluidora para os 10 mil litros de leite recepcionados/refrigerados foi de 8,325 kg DBO/ dia.

Dessa forma, a carga poluidora total do empreendimento em questão foi de 124,325 kg DBO/dia.

Considerou-se a carga *per capita* de DBO igual a 0,054kg DBO/ hab.dia, de acordo com a literatura técnica pertinente (VON SPERLING, 2014), e o período de violação dos padrões de lançamento de 1.651 dias, que corresponde a 4,52 anos, haja vista o ano comercial de 365 dias.

Diante do exposto e por meio da Equação 1, a carga de DBO correspondeu à população de 2.303 habitantes:

$$\text{Equivalente Populacional (EP)} = \frac{\text{Carga poluidora total de DBO}}{\text{carga per capita de DBO}} \quad \text{Equação 1}$$

Na precificação foram considerados os custos de operação e de manutenção apresentados por von Sperling (2014), para um sistema de tratamento que utiliza a técnica de Lodos Ativados.

Considerando a população (EP), o custo médio de operação e manutenção referente ao sistema lodos ativados, apresentado por von Sperling

(2014, p. 358), igual a R\$ 30,00/hab.ano, e o período de 4,52 anos, obtém-se o valor total de R\$ 312.286,80. Esse valor foi corrigido conforme fator de atualização monetária do TJMG por meio do mecanismo interno da CEAT/MPMG, disponível em: <https://aplicacao.mpmg.mp.br/siscat/calcularAtualizacaoMonetaria.do> para janeiro de 2022.

Assim, o dano ambiental ocasionado pelo lançamento irregular de efluentes líquidos, sem prévio tratamento, no curso de água – no período considerado – resultou em um *quantum debeatur* equivalente a R\$ 504.103,22 (quinhentos e quatro mil, cento e três reais e vinte e dois centavos).

3.2. Poluição sonora

A valoração econômica do dano decorrente da poluição sonora considera os custos que foram evitados pelo empreendedor ao longo do tempo e que são imprescindíveis para sua plena regularização e atendimento dos parâmetros normativos²⁵. Esse método destina-se a avaliar **o custo de controle evitado pela empresa** ao não controlar satisfatoriamente as emissões sonoras, causando danos ao meio ambiente e incômodo à população (conforme previsto no licenciamento), e a geração de elevados níveis de ruído, caracterizando poluição sonora. Trata-se de método previsto na NBR 14.653-6 da ABNT, que também o sugere para casos de poluição hídrica e atmosférica, e indicado por Valle²⁶.

Estima-se o custo de controle evitado pela empresa e aplica-se uma taxa de juros (i) legais ao mês, e um período de (n) meses, relativos ao tempo transcorrido desde o início da ocorrência dos danos até o momento da produção do laudo.

O valor resultante corresponderá à indenização por dano material irreversível e deve ser conjugado com a indenização por danos morais coletivos em virtude da lesão à qualidade de vida que ocorreu em razão da poluição sonora que pode ser objeto de Valoração Contingente²⁷ ou de arbitramento judicial, a exemplo do que decidiu o Tribunal de Justiça do Estado do Rio Grande do Sul, em um caso de poluição sonora em virtude de atividades ocorridas em um templo religioso com o uso

²⁵PARAÍSO, M. L. S. Metodologias de avaliação econômica dos recursos naturais. *Revista Direito Ambiental*, 6, 97-107 (1997).

²⁶VALLE, Manuel Castañón. *Valoración del Daño Ambiental*. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – Oficina Regional para a América Latina e o Caribe. Cidade do México, 2006, pp. 64-69.

²⁷ O método da Valoração Contingente está descrito no Capítulo 1º.

de som amplificado. Neste caso, o dano moral coletivo foi arbitrado em dez mil reais. Confira-se a ementa:

APELAÇÃO CÍVEL. DIREITO AMBIENTAL. AÇÃO CIVIL PÚBLICA. OBRIGAÇÃO DE FAZER E INDENIZAÇÃO POR DANOS MORAIS COLETIVOS. POLUIÇÃO SONORA. CULTO RELIGIOSO. PERTURBAÇÃO DO SOSSEGO. ILÍCITO COMPROVADO. DANO MORAL COLETIVO. DEVER DE INDENIZAR. FUNDO DE RECONSTITUIÇÃO DE BENS LESADOS. - A Constituição da República de 1988 expressamente previu que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (art. 225, caput), bem como outorgou competência comum à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios para proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas (art. 23, VI). Da mesma forma, estabelece o art. 5º, VI, da Constituição da República, ser “inviolável a liberdade de consciência e de crença, sendo assegurado o livre exercício dos cultos religiosos e garantida, na forma da lei, a proteção aos locais de culto e a suas liturgias”. Havendo colisão de direitos de estatura constitucional, a solução impõe o estabelecimento de condicionamentos recíprocos, de forma a alcançar uma harmonização entre os bens, a fim de se evitar o sacrifício total de um deles. Fiel a este entendimento, a orientação desta Corte é no sentido de que, embora a Constituição da República assegure o livre direito ao culto, as celebrações não devem perturbar o sossego dos moradores vizinhos, devendo haver uma harmonização dos interesses postos em conflito. - No ponto, convém destacar que, conforme perícia realizada pela fiscalização municipal, “ocorria a emissão de som incômodo devido ao emprego de som amplificado e das vozes e cânticos ocorridos no interior da igreja, pois $RF+RA > RF + 5 \text{ dB(A)}$, caracterizando infringência aos artigos 1º e 3º, inciso X, alínea “a” do Decreto Municipal n.º 8.185/83 que regulamenta a Lei Complementar nº 65/81”. Nesse cenário, embora os autos indiquem que as reformas acústicas realizadas pela demandada tenham diminuído a emissão de ruído, merece acolhimento o pleito recursal de condenação da apelada por danos morais coletivos, já que a conduta ilícita restou

comprovada, causando dano ambiental por poluição sonora. APELO PROVIDO²⁸.

3.3. Poluição atmosférica

3.3.1. Compensação das emissões de dióxido de carbono por meio de plantio de vegetação²⁹

Uma alternativa de valoração econômica do dano ambiental decorrente da poluição atmosférica é a utilização da **metodologia de compensação das emissões de dióxido de carbono por meio de plantio de vegetação**, com base em diversos estudos de mitigação biológica para emissões de CO₂ por sequestro de carbono (AGUIAR, FORTES, MARTINS, 2016; CASTRO, 2017; MILHEMEM, 2012; OLIVEIRA, S. G. L.; VASCONCELOS, N. V. C.; GOUVINHAS, R. P.; RAMOS, 2010)

Essa abordagem metodológica vem sendo aplicada na compensação dos impactos ambientais gerados em diversos cenários e foi usada em um caso concreto para calcular os danos ambientais associados à poluição atmosférica ocasionada por incêndio de grandes proporções em uma empresa no município de Nova Santa Rita, RS³⁰. O caso merece aprofundamento pelo seu caráter inovador, na medida em que considera a relação entre a poluição atmosférica e a emissão de gases de efeito estufa que concorrem para o aquecimento global:

Sabe-se que a *combustão* é uma reação química que ocorre entre um combustível e um comburente. Durante esse fenômeno, ocorre grande *liberação de energia* e de *gases produtos da combustão*, tais como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), vapores de água (H₂O) e óxidos de nitrogênio (NO_x). A composição dos gases gerados durante a combustão depende da natureza do combustível. O dióxido de carbono (CO₂) é o principal produto da combustão da maioria dos materiais, constituídos por átomos de carbono.

²⁸TJRS. Apelação Cível, Nº 70084187947, Vigésima Segunda Câmara Cível, Tribunal de Justiça do RS, Relator: Marilene Bonzanini, Julgado em: 26-11-2020. Em seu voto, a Relatora entendeu que o quantum da indenização por danos morais deve atender a uma dupla finalidade: reparação e repressão, sendo que, para a fixação do valor, levam-se, em conta, basicamente, as circunstâncias do caso, a gravidade do dano, a situação do lesante, a condição do lesado, preponderando em nível de orientação central, a ideia de sancionamento ao lesado”.

²⁹ Esta seção foi redigida pelo Eng. Flávio Faccin, do GAT – MP/RS.

³⁰ Conforme descrito nos Documentos 1039/2018 e 0370/2019, UAA/GAT/MPRS.

O *dióxido de carbono* é reconhecidamente o principal gás *causador do efeito estufa*, fenômeno responsável pelo aumento médio da temperatura da Terra. Por esse motivo, o controle das emissões de CO₂ tem se tornado o principal foco das políticas ambientais visando o combate ao aquecimento global (MA;REN; ZHANG, SHARP, 2018):

No ciclo biogeoquímico do carbono, a *fotossíntese* merece destaque. Trata-se de uma reação química realizada por vegetais, algas e algumas espécies de bactérias em que o dióxido de carbono é transformado em carboidrato, fixando-o na forma de biomassa. O carbono removido da atmosfera permanece no vegetal (tronco, galhos, folhas, raízes) por vários anos (MILHOMEN, 2012).

Neste contexto, surgiu a política de *sequestro de carbono*, ou seja, processo de *mitigação biológica* realizado por vegetais que absorvem o CO₂ da atmosfera, transformando-o em biomassa (FLIZIKOWSK, 2012).

No caso concreto, o incêndio atingiu o depósito de produtos alimentícios refrigerados da empresa investigada. Além da poluição atmosférica decorrente, ocorreram danos ambientais devido à contaminação do solo e de recurso hídrico (açude) pelo lançamento de efluentes líquidos gerados durante as operações de combate ao incêndio.

Os técnicos do órgão ambiental que atenderam a emergência estimaram que a área de depósito sinistrado foi de 15.000 m². Consta na descrição da infração aplicada que a fumaça oriunda do incêndio incidiu sobre área urbanizada, sujeitando a população local a riscos a sua saúde. Portanto, fica evidenciado que a empresa investigada concorreu para a degradação da qualidade ambiental pelo lançamento de gases poluentes para a atmosfera, ainda que em episódio alheio a sua vontade.

Segundo os documentos apresentados pelo investigado, a massa de produtos alimentícios consumidos durante o incêndio foi 195 toneladas. A partir dessa informação, o Quadro 4 apresenta os principais resultados do cálculo de valoração econômica, considerando tal realidade.

Quadro 4- Resultados do cálculo de valoração econômica da degradação ambiental promovida pelo investigado pelo lançamento de CO₂ para a atmosfera, considerando as informações apresentadas pela empresa.

Massa de produtos alimentícios consumidos durante o incêndio no cenário real	195.000 kg
Massa de carbono no produto alimentício ³¹	21.782 kg
Massa de dióxido de carbono gerado na combustão ³²	79,938 toneladas
Neutralização compensatória de CO ₂ por reflorestamento em hectare de Mata Atlântica em 30 anos ³³	317,24 ton CO ₂ /hectare
Área de reflorestamento para compensar emissões de CO ₂ geradas no incêndio	0,252 hectare
Estimativa de custo associado ao reflorestamento compensatório ³⁴	R\$ 4.359,70

Fonte: GAT-MP/RS

Portanto, no *cenário apresentado* e considerando as premissas de cálculo apresentadas no Quadro 4, estimou-se que seria necessário desenvolver *projeto de reflorestamento em 0,252 hectare de Mata Atlântica* (preservada por 30 anos) para compensar os impactos ambientais relacionados às emissões de CO₂ geradas durante o incêndio em questão. Em termos econômicos, isto representa o valor de R\$ 4.359,70 (quatro mil, trezentos e cinquenta e nove reais e setenta centavos).

Caso a empresa investigada opte por arcar com os custos associados ao reflorestamento ao invés de executar essa medida, o valor mencionado no Quadro 4 precisa ser corrigido para o período de 30 anos (base de cálculo para a neutralização do CO₂ liberado para a atmosfera). Deste modo, no caso concreto a estimativa do custo de manutenção será R\$ 7.546,55, valor adicional ao que consta no Quadro 4. Portanto, o valor total correspondente neste cenário é R\$ 11.906,24 (onze mil, novecentos e seis reais e vinte e quatro centavos).

³¹Composição do produto cárneo utilizado nos cálculos: 75% água, 19% proteínas, 2,5% lipídeos e 3,5% outros. Segundo trabalho publicado em Journal of Biochemical and Biophysical Methods 22(2), 1991, p. 119-128, a proporção de carbono em proteínas e carboidratos é, respectivamente, 0,53 g C/g proteína e 0,44 g C/g carboidrato.

³² Estequiometricamente, 12 g de carbono geram 44 g de dióxido de carbono. Portanto, o fator de conversão de carbono a dióxido de carbono é 3,67 g CO₂/g C.

³³Conforme proposto no estudo de Aguiar, Fortes e Martins (2016).

³⁴ Estimativa obtida multiplicando-se a área a ser plantada pelo custo de reflorestamento com espécies nativas (calculado à época como sendo de R\$ 17.301,76 por hectare).

Em síntese, como *medida compensatória* às degradações ambientais causadas pelo empreendimento investigado, sugeriu-se a apresentação de projeto técnico contemplando o *plantio de vegetação*, visando o sequestro de carbono. Segundo as premissas de cálculo apresentadas na seção anterior desse parecer, estimou-se que a área de plantio seja *0,252 hectare* e que a *manutenção da área* estenda-se pelo *período de 30 anos*.

Caso os representantes da empresa investigada optem por arcar com os custos de reflorestamento, ao invés de executar essa ação propriamente dita, o montante total corresponderia a *R\$ 11.906,24* (onze mil, novecentos e seis reais e vinte e quatro centavos), referente ao plantio e conservação dessa área pelo período de 30 anos.

Para avaliar monetariamente os danos ambientais causados pela poluição decorrente de incêndios florestais, pode-se estimar também as emissões de gases do efeito estufa. Roquette (2020) estimou as emissões de CO₂, metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) após incêndio ocorrido em 33.065,46 hectares de vegetação nativa no Pantanal mato-grossense. Para cálculo das emissões foram estimadas as biomassas aéreas dos diferentes tipos de vegetação afetados, que foram identificados com a sobreposição de mapa de vegetação da região do IBGE com a área queimada interpretada em imagens de satélites. Valores de biomassa aérea foram obtidos na literatura científica para fitofisionomias semelhantes e usados como referência, e então estimada a quantidade de biomassa consumida pelo fogo utilizando fatores de combustão, também descritos na literatura. Assim, a quantidade de biomassa seca queimada foi utilizada para calcular as emissões de gases a partir de respectivos fatores de emissão, que estimam a quantidade de determinado gás liberado pela queima de uma unidade de biomassa seca, conforme descrito em Andreae (2019).

No caso em tela, estimou-se a emissão de 2.224.988,82 toneladas de CO₂ decorrente do incêndio. Seguindo o critério de avaliação monetária pelos custos de neutralização do CO₂ pelo reflorestamento, seria necessário o plantio de uma área igual a queimada com a espécie nativa *Vochysia divergens* Pohl., com manutenção durante 28 anos³⁵, para sequestrar novamente o carbono armazenado que foi emitido para atmosfera. Assim, os custos do plantio e manutenção podem representar o valor

³⁵ Considerou-se o armazenamento médio de 2,37 ton. C ha⁻¹ ano⁻¹, calculado a partir dos dados Schöngart et al. (2008).

monetário dos danos ambientais causados pela poluição atmosférica devido ao incêndio no imóvel rural.

3.3.2. Emergia

Outro método aplicável à poluição atmosférica é a Emergia, conforme estudo de Diniz, publicado na Coletânea de estudos de caso sobre valoração econômica de danos ambientais, organizada pelo Ministério Público de Minas Gerais (2020). No caso analisado, foi efetuada a valoração econômica dos serviços ambientais afetados pela poluição atmosférica das indústrias de ferro-ligas, situadas na sub-bacia do Rio Verde Grande (MG) e foi calculada a indenização a ser paga pelas empresas até a instalação dos filtros exigidos pelos órgãos ambientais.

Os serviços ambientais foram quantificados em termos de energia solar incorporada (emergia) e, posteriormente, convertidos em uma unidade monetária que utiliza o índice de equivalência emergia/dólar estabelecido para o Brasil. Verificou-se que os valores monetários obtidos permitiram a distribuição do ônus pelo dano ambiental de forma proporcional à carga de poluentes emitida pelas indústrias.

Para a valoração econômica dos danos ambientais, foi enfatizado e analisado o serviço ambiental associado ao recurso natural, ar, o qual foi afetado pela emissão, sem o devido tratamento, de efluentes atmosféricos, contendo material particulado, provenientes dos fornos dos empreendimentos do setor de ferro-ligas, instalados na Sub-Bacia do Rio Verde Grande.

A emergia do serviço ambiental e seu respectivo valor monetário foram quantificados, inicialmente, por meio da estimativa das emissões do poluente material particulado, em kg/h e kg/ano, oriundas dos fornos de cada empresa. Em seguida, foram determinadas as massas de ar, em kg/ano, utilizadas para a diluição das emissões de material particulado até o padrão de qualidade do ar estabelecido pela legislação vigente (Deliberação Normativa do COPAM n.º 01, de 26 de maio de 1981)³⁶. Calculou-se, então, a energia cinética (serviço ecossistêmico), em Joule (J)/ano, das massas de ar durante a diluição dos poluentes, a qual foi convertida, posteriormente, em uma medida emergética equivalente (SeJ/ano), por meio do fator de conversão de energia em emergia (energia solar incorporada), denominado

³⁶MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM n.º 01, de 26 de maio de 1981. *Diário do Executivo* – “Minas Gerais”. Belo Horizonte, MG, 2 jun. 1981.

Transformidade Solar ou Índice de Transformidade, expresso em energia 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 energia do serviço ambiental associado às massas de ar foi obtida, em termos monetários (dólar), utilizando o índice de equivalência energia/dólar ($3,0 \times 10^{12}$ SeJ/U\$), determinado para o Brasil por Ortega (2000). Este índice permite comparar a energia do serviço afetado à energia 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 08/04/2011, data da assinatura do acordo, firmado com o Ministério Público do Estado de Minas Gerais, que estabelecia o prazo final para a instalação de filtros nas indústrias de Ferro-Ligas.

A seguir, serão detalhadas as etapas da metodologia emergética, utilizada para a quantificação dos serviços ecossistêmicos afetados pelas emissões de poluentes (material particulado), provenientes das indústrias de ferro-ligas situadas na Sub-Bacia do Rio Verde Grande.

Estimativa das emissões de material particulado dos fornos

A taxa de emissão (ou carga) de material particulado, em kg/h, foi calculada, por meio da Equação (1), para os fornos de cada empresa, as quais, de agora em diante, serão denominadas empresas L, M, N, O, P e Q:

$$W = C \times V \quad (1)$$

Onde:

W = taxa de emissão ou carga de material particulado, em kg/h

C = concentração de material particulado emitida pela chaminé, em kg/Nm³

V = vazão de lançamento de efluentes pela chaminé, em Nm³/h

Foram atribuídos às variáveis C e V da Equação (1), os valores de concentração de material particulado e vazão, respectivamente, que constam no estudo realizado em 2005 pelo órgão ambiental (FEAM, 2005)³⁷, apresentados no

³⁷FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – FEAM. *Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferro-ligas no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte:

Quadro 1. Além disso, para a estimativa da taxa de emissão anual de material particulado, foi considerado que o período efetivo de produção de cada forno corresponde a 7980 horas em 12 meses, exceto os fornos F1, F2 e F3 da empresa L, para os quais foi considerado um período de produção de 780 horas por ano.

Quadro 1 – Dados das empresas integrantes do Acordo Setorial Ferro-Ligas

Empresa	Município	Número de fornos sem filtros	Vazão dos efluentes em cada forno (V)	Concentração de material particulado na saída das chaminés (C)
L	Montes Claros	4 (F1, F2, F3 e F4)	F1 – 225.464 Nm ³ /h F2 – 512.420 Nm ³ /h F3 – 392.854 Nm ³ /h F4 – 392.854 Nm ³ /h	F1 – 1400 mg/Nm ³ F2 – 1800 mg/Nm ³ F3 – 1600 mg/Nm ³ F4 – 1650 mg/Nm ³
M	Montes Claros	1 (F1)	F1 – 31.695,3 Nm ³ /h	F1 – 2.428,98 mg/Nm ³
N	Bocaiúva	1 (F1)	F1 – 280.000 Nm ³ /h	F1 – 2.000 mg/Nm ³
O	Varzelândia	6 (F1, F2, F3, F4, F5 e F6)	F1 – 60.450 Nm ³ /h F2 – 114.000 Nm ³ /h F3 – 114.000 Nm ³ /h F4 – 281.800 Nm ³ /h F5 – 281.800 Nm ³ /h F6 – 281.800 Nm ³ /h	F1 – 1.800 mg/Nm ³ F2 – 1.800 mg/Nm ³ F3 – 1.800 mg/Nm ³ F4 – 1.800 mg/Nm ³ F5 – 1.800 mg/Nm ³ F6 – 1.800 mg/Nm ³
P	Capitão Enéias	2 (F1 e F2)	F1 – 280.000 Nm ³ /h F2 – 280.000 Nm ³ /h	F1 – 1.800 mg/Nm ³ F2 – 1.800 mg/Nm ³
Q	Capitão Enéias	3 (F1, F2 e F3)	F1 – 150.000 Nm ³ /h F2 – 150.000 Nm ³ /h F3 – 150.000 Nm ³ /h	F1 – 1.700 mg/Nm ³ F2 – 1.700 mg/Nm ³ F3 – 1.700 mg/Nm ³

Fonte: FEAM (2005)

Determinação das massas de ar para a diluição dos poluentes

A inexistência dos filtros na saída da chaminé dos fornos ocasionou a degradação da qualidade do ar, devido à emissão de poluentes, como o material

particulado, acima dos limites estabelecidos pela legislação vigente. Conseqüentemente, uma massa de ar foi comprometida para a realização do trabalho de diluição do poluente até o padrão de qualidade do ar, definido na Deliberação Normativa COPAM nº 01, de 26 de maio de 1981 (DN COPAM nº 01/1981). Dessa forma, o cálculo das massas de ar para a diluição das emissões atmosféricas de cada forno foi realizado por meio da Equação (2):

$$m = d \frac{W}{c} \quad (2)$$

Onde:

m = massa de ar para a diluição, em kg/ano

d = densidade do ar = 1,23 kg/m³ (ULGIATI e BROWN, 2002)

W = carga de material particulado emitida anualmente, em kg/ano

c = concentração máxima permitida de material particulado na atmosfera = 80 µg/m³ = 8 x 10⁻⁸ kg/m³ (D.N.COPAM 01/1981)

Cálculo da energia cinética das massas de ar

A energia cinética das massas de ar, necessárias para diluição do material particulado, foi calculada, em Joules, por meio da Equação (3):

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3)$$

Onde:

E_c = energia cinética das massas de ar, em J/ano

m = massa de ar para a diluição, em kg/ano

v = velocidade média do vento na região = 1,67 m/s (FEAM, 2005)

Determinação da energia das massas de ar

A energia das massas de ar, necessárias para diluição do material particulado, foi obtida, em termos de energia solar incorporada (SeJ), por meio da Equação (4):

$$E = E_c \times T$$

(4)

Onde:

E = energia das massas de ar, em SeJ/ano

E_c = energia cinética das massas de ar, em J/ano

T = índice de transformidade para o ar = $1,5 \times 10^3$ SeJ/J (ODUM, 1996)

Determinação do valor monetário dos serviços ambientais

A energia do serviço ambiental associado às massas de ar foi obtida em Dólares (U\$), por meio da Equação (5) e, posteriormente, convertida em Reais (R\$) por meio da Equação (6):

$$D = E \times I$$

(5)

$$R = D \times A$$

(6)

Onde:

D = serviço ambiental associado às massas de ar, em dólares (U\$)/ano

R = serviço ambiental associado às massas de ar, em reais (R\$)/ano

E = energia das massas de ar, em SeJ/ano

I = índice de equivalência = $3,0 \times 10^{12}$ SeJ/U\$ (ORTEGA, 2000)

A = cotação do dólar em 08/04/2011 = R\$ 1,62/U\$ (Banco Central do Brasil www.bcb.gov.br, acesso em 08/04/2011)

3.3.3. Custo de Controle Evitado

Merece, ainda, referência, a possibilidade de adoção do método de custos de controle evitados, conforme precedente do Ministério Público do Rio de Janeiro em um caso que buscava atender aos parâmetros para valoração do dano definidos em um acórdão do Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro³⁸. Na decisão judicial, os réus foram condenados ao "pagamento de valor pecuniário, a título reparatório e compensatório pertinente aos danos ambientais causados, que pode ser auferido pelos projetos de contenção de emissão de resíduos gasosos apresentados no processo administrativo em anexo"³⁹. Portanto, era preciso identificar o custo de elaboração e de execução dos projetos que impediriam a poluição atmosférica.

O método de custos de controle evitados adota os custos necessários ao impedimento da variação no fluxo do serviço ambiental como aproximação do valor econômico do serviço perdido. Ou seja, "não se trata de uma valoração direta do dano ambiental por meio de sua extensão e magnitude, mas do quanto se deve gastar para que o serviço ambiental se mantenha inalterado"⁴⁰. No caso analisado, foi utilizado o custo aproximado das medidas que seriam necessárias para se minimizar as emissões atmosféricas da unidade industrial da empresa requerida.

No laudo, considerou-se que a poluição atmosférica provocada pelas atividades industriais poderia ter sido evitada caso a empresa tivesse adotado um sistema de controle de acordo com o apresentado nos autos desde o início de suas operações. Além disso, sugeriu-se a adição do custo de oportunidade pelo tempo em que as pessoas ficaram sem o serviço ambiental.

A fórmula adotada para o cálculo do valor econômico do dano ambiental foi a seguinte

$$\text{Valor econômico do dano ambiental} = \text{CC} \times \text{custo de oportunidade } t$$

Onde:

CC: é o custo das medidas de controle que deveriam ter sido adotadas pelo poluidor na data de constatação do dano ambiental, em valores da época em que deveria ter sido implantado;

³⁸MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Informação Técnica 1103/2019.

³⁹ TJRJ, ACP n. 0007043-89.2005.8.19.0007, citado na Informação Técnica 1103/2019.

⁴⁰ Informação Técnica 1103/2019.

Custo de oportunidade t : taxa acumulada do mês t até a data n de fim das operações da empresa⁴¹.

Vale destacar que este método exige que os custos de manutenção e operação do sistema também sejam considerados. No entanto, a título de simplificação, no parecer ora referido, somente foram considerados os custos diretos de implantação do sistema de controle da poluição.

3.4. Poluição do solo e da água subterrânea

3.4.1. Custo de Remediação da Área Degradada⁴²

O *solo* é um dos componentes do meio ambiente. É um meio em que se desenvolvem *diversos microrganismos* (bactérias, fungos, protozoários, ...) e *pequenos animais* (minhocas, insetos, ...). A maior concentração de microrganismos no solo ocorre em uma profundidade de até 20 cm. Nesta camada estão presentes bactérias aeróbias, bactérias anaeróbias, fungos e protozoários (COTRIM, 2012; reginatto, 2012).

Do ponto de vista de *utilização*, o solo pode ser direcionado para atividades com *fins recreativos* (passeio, acampamento, caminhada), *produtivos* (produção agrícola, pastagem, uso florestal, extração) ou *viários* (estradas).

Quando compostos estranhos a sua natureza (ditos xenobióticos) são depositados no solo, causando prejuízos às diversas formas de vida, alteração de sua estrutura ou perda de funções, diz-se que ocorreu *poluição do solo*.

Uma alternativa de valoração econômica do dano ambiental decorrente da poluição do solo é a utilização do método indireto de valoração ambiental com base em estimativas de ***custos de remediação da área impactada***.

⁴¹Conforme consta do parecer, “optou-se pela aplicação do custo de oportunidade até o fim das operações da empresa por conta das características dos poluentes atmosféricos que, com o fim das atividades, tendem a reduzir rapidamente sua influência na qualidade do ar local. Ou seja, em teoria, os serviços ambientais estariam reestabelecidos”.

⁴² Esta seção foi redigida pelo Eng. Flávio Faccin, do Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul.

A *remediação de solos* contaminados consiste na aplicação de técnicas para *eliminar poluentes xenobióticos* presentes neste ambiente. Há uma variedade de vias biológicas, químicas e físicas que podem ser utilizadas para tal finalidade, podendo ser aplicada tanto diretamente no local da contaminação (“*in situ*”) como fora desse local (“*ex situ*”).

As *técnicas de descontaminação in situ* apresentam como vantagem a redução dos custos de tratamento. Contudo, o poluente permanece no local por maior intervalo de tempo. Adicionalmente, sua aplicação em solos com características argilosas é dificultada e os produtos da decomposição do poluente permanecem no meio ambiente. As técnicas de descontaminação *ex situ*, por sua vez, apresentam custos mais elevados, mas os riscos associados à permanência do poluente no local são eliminados imediatamente com a remoção do solo contaminado.

O Quadro 5 sintetiza as características das principais técnicas de remediação de solos contaminados (MENEGUETTI, 2007; GRACIANO; PIRES, TEIXEIRA, ZIOLLI, PEREZ, 2012).

Quadro 5 - Descrição das principais técnicas de remediação de solos contaminados por poluentes xenobióticos.

Técnica	Descrição
Compostagem	Técnica de descontaminação <i>ex situ</i> em que microrganismos termófilos aeróbios são aplicados em pilhas construídas para degradar o poluente presente no solo contaminado.
Atenuação natural	Técnica de descontaminação <i>in situ</i> por meio da qual o poluente é naturalmente degradado pela ação da microbiota nativa do solo impactado. Fenômenos físicos e químicos, como lixiviação e volatilização do poluente, complementam o processo de descontaminação. O tempo envolvido na atenuação natural é bastante longo, estendendo-se de meses a anos.
Bioaumentação	Técnica de descontaminação <i>in situ</i> por meio da qual microrganismos específicos são adicionados ao solo contaminado para eliminar poluentes específicos. Contudo, a adição desses microrganismos pode causar desequilíbrio ecológico no ambiente já impactado pelos poluentes.

Oxidação química	Técnica de descontaminação <i>in situ</i> na qual alguns compostos químicos oxidantes são adicionados ao solo para promover a degradação do poluente. Essa técnica permite alcançar alta eficiência na remoção do contaminante em curto intervalo de tempo.
------------------	---

Fonte: GAT/MP-RS

Como exemplo de utilização desta metodologia pode-se citar um caso de *vazamento de biodiesel de grandes proporções* nas instalações de uma empresa de Veranópolis, RS⁴³. O biodiesel atingiu o solo e recurso hídrico, contaminando-os e causando, em tese, a mortandade de peixes.

O *biodiesel* é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais e gordura animal, sendo utilizado principalmente em motores de veículos pesados (caminhões e ônibus). É um produto mais biodegradável do que o diesel convencional. Contudo, ele pode causar significativos *impactos ambientais*, sobretudo para organismos aquáticos.

No *solo*, o biodiesel também apresenta *efeitos negativos*, dentre os quais a literatura técnica (HAWROT-PAW, KONIUSZY, ZAJAC, SZYSZLAK-BARGLOWICZ, 2020) cita (i) efeitos genotóxicos e mutagênicos; (ii) efeitos negativos sobre a fisiologia vegetal, com redução na taxa de germinação de sementes; e (iii) diminuição da biomassa microbiana. Em recente pesquisa científica sobre o tema, observou-se o efeito negativo que o solo contaminado com biodiesel apresenta sobre anelídeos. No experimento, foi constatada *alta taxa de mortalidade de minhocas*, inclusive maior do que em solo contaminado com diesel convencional.

Segundo os pesquisadores que conduziram o estudo, há a hipótese de que, no solo, o biodiesel sofra um *processo de transesterificação inversa*, ou seja, reação química que promove a *formação de metanol*, composto reconhecidamente tóxico. Isto reforça a necessidade de que ações imediatas de remediação sejam tomadas no caso de derramamento de biodiesel em solo, para evitar a ocorrência da reação de transesterificação inversa e a liberação de compostos ainda mais poluentes para o meio ambiente.

⁴³ Conforme descrito nos Documentos 0086/2019 e 0016/2021, UAA/GAT/MPRS.

No exemplo citado, os elementos técnicos, extraídos do material encaminhado para análise, relacionados ao vazamento de biodiesel nas instalações da empresa, que fundamentaram a valoração ambiental, estão compilados no Quadro 6.

Quadro 6 - Elementos técnicos extraídos do material encaminhado para análise

Identificação do documento	Elementos técnicos	Conclusão
Relatório IP nº 015/2013/700705-A, elaborado pelo Departamento Estadual de Investigações Criminais da Polícia Civil	O vazamento foi percebido por vizinhos da empresa às 8 h de 05/02/2013. Às 11 h e 30 min, o vazamento ainda persistia.	O vazamento teve duração de, no mínimo, 3 h e 30 min.
	Em 10/02/2013 foi constatada a morte de peixes.	Houve dano irreversível à fauna local 5 dias após o vazamento de biodiesel.
	Cerca de 900 m ² em área adjacente ao tanque onde ocorreu o vazamento foi atingida pelo biodiesel. Esse produto não é um constituinte natural do solo. Logo, sua presença no ambiente altera as características naturais do solo.	Além de causar poluição hídrica, o vazamento de biodiesel causou poluição do solo.
	O operador da área onde ocorreu o vazamento afirmou que iniciou a transferência de biodiesel entre tanques no dia anterior ao vazamento. Tal atividade teria cessado às 18 h. Contudo, no dia seguinte (às 7 h) ele constatou o vazamento de biodiesel.	O vazamento teve duração máxima de 17 h e 30 min, pois pode ter iniciado às 18 h do dia 04 de fevereiro de 2013 e cessado às 11 h e 30 min do dia 05 de fevereiro de 2013.
Relatório de fiscalização dirigida nº 054/2013	Aponta que o vazamento causou contaminação de grande parte de solo e de águas superficiais. Em 08/02/2013, durante vistoria, ainda	Portanto, não houve ação de remediação imediata, pois 3 dias após o vazamento

SEFIND/FEPAM	havia sinais de contaminação de solo e vegetação com biodiesel.	foram constatados sinais de contaminação no solo e na vegetação. A falta de ação imediata de remediação permite que a contaminação atinja camadas mais profundas do solo.
Parecer técnico sobre valor	Trata-se de um documento de valoração de um lote de terras situado na Linha Tomas Flores, elaborado pela assessoria técnica da Prefeitura Municipal de Veranópolis.	O valor total do terreno foi estimado em R\$ 173.000,00.
Boletim de ocorrência ambiental nº 112/015/fevereiro - 13, elaborado pelo Comando Ambiental da Brigada Militar	Cita que os policiais militares constataram às 11 h do dia 05 de fevereiro de 2013 o extravasamento de biodiesel no tanque TQ-04-05 da área de armazenamento deste produto químico. Aponta, ainda, que a alimentação desse tanque foi interrompida apenas com a chegada dos policiais ao local.	Há elementos indicando que o vazamento de biodiesel persistiu até as 11 h da manhã do dia 05 de fevereiro de 2013.
	Informa que no dia 10 de fevereiro de 2013 foram constatados vários pontos com peixes mortos às margens do Arroio Jaboticaba, em extensão de 4 km. Entre os peixes mortos predominavam indivíduos das espécies Jundiá e Cascudo.	Portanto, há evidências de que houve morte de peixes no Arroio Jaboticaba alguns dias após ter ocorrido a contaminação desse recurso hídrico com biodiesel. Não há informação sobre o número de indivíduos mortos.
Relatório descritivo das causas do	Indica que o vazamento de biodiesel teria iniciado às 4 h da madrugada do dia 05/02/2013 e cessado às 07 h e 30	Portanto, segundo esse relatório, o vazamento de biodiesel teria

acidente, ref.: Auto de Infração nº 0211/2013	min daquele dia. A vazão de biodiesel foi estimada em 10 m ³ /h. Informa que 18 m ³ de biodiesel teriam sido retidos em bacia de contenção e 16,4 m ³ teriam sido recuperados nas atividades de remediação do recurso hídrico. Deste modo, o volume de biodiesel que teria atingido o meio ambiente seria de apenas 1,6 m ³ .	ocorrido à vazão de 10 m ³ /h.
---	---	---

FONTE: GAT MP/RS

A valoração econômica associada à contaminação do solo foi realizada com base em estimativas de **custos de remediação da área impactada**. Entendeu-se que a remediação aplicável ao caso consistiria na remoção imediata do solo contaminado e seu encaminhamento para disposição final e/ou tratamento.

Elementos técnicos trazidos à análise evidenciaram que houve contaminação de solo por biodiesel em *área* com, aproximadamente, 900 m². Devido à ausência de informações relativas à profundidade da contaminação, esse parâmetro precisou ser estimado, conforme consta na Tabela 1.

Estima-se que no período considerado a *contaminação do solo* atingiu aproximadamente 65 cm de profundidade. Este valor está coerente com a espessura de camada do solo onde há maior predominância de microrganismos. Logo, trata-se da camada de solo *mais impactada* pela *exposição ao biodiesel*. Dessa forma, estima-se em 585 m³ o *volume de solo impactado* pelo derramamento de biodiesel causado pela empresa demandada.

A Tabela 1 apresenta uma estimativa das parcelas de custos envolvidos nas atividades de remediação de solo contaminado por produtos químicos. Segundo os dados dessa tabela, estima-se em R\$ 913,53 o *custo para tratar* cada metro cúbico de *solo contaminado*. O *custo total de remediação da área impactada*, consistente na remoção, transporte e tratamento final desse volume de solo contaminado.

Deste modo, estima-se em R\$ 534.415,05 o valor econômico associado à degradação ambiental promovida pela empresa demandada devido ao derramamento de biodiesel e *contaminação do solo*.

Tabela 1 Dados utilizados para estimar o custo total de remediação da área contaminada.

Parâmetro	Valor	Fonte
Tipo de solo	Latossolo Vermelho Distroférrico Típico (LVdf1)	Grellmann <i>et al.</i> (2003)
Condutividade do biodiesel no solo	$2,54 \times 10^{-4}$ cm/s	Schlosser (2017)
Tempo de exposição do solo ao contaminante	3 dias	Relatório de fiscalização dirigida nº 054/2013 SEFIND/FEPAM (Quadro 2)
Profundidade da contaminação	65,8 cm	Calculado ⁴⁴
Área impactada	900 m ²	Relatório IP nº 015/2013/700705-A, elaborado pelo Departamento Estadual de Investigações Criminais da Polícia Civil (Quadro 2)
Volume de solo contaminado	585 m ³	Calculado ⁴⁵
Consultoria ambiental	R\$ 141,25	Cotrim (2012)
Serviços preliminares (sondagens, laudos, autorizações ambientais)	R\$ 157,14	
Serviços de remoção e transporte do solo contaminado	R\$ 149,43	
Recuperação do local '(reposição de solo, monitoramento)	R\$ 280,71	

⁴⁴ Corresponde ao produto entre a condutividade do biodiesel no solo e o tempo de exposição do solo ao contaminante, com os devidos ajustes nas unidades de medida.

⁴⁵ Corresponde ao produto entre a área impactada e a espessura de solo contaminado.

Biorremediação de solo contaminado	R\$ 185,00	Bianchi, Sanberg (2019)
Custo unitário da atividade de remediação	R\$ 913,53	Calculado ⁴⁶
Custo total de remediação da área	R\$ 534.415,05	Calculado ⁴⁷

Fonte: GAT-MP/RS

Por fim, merece referência o estudo de Kaskantzis Neto (2011), que analisou o emprego dos métodos Custos Ambientais Totais Esperados - CATES, valor da Compensação Ambiental - VCP, Análise de Equivalência do Habitat (HEA) e o método proposto pelo Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais do Estado de São Paulo - DPRN para um caso de contaminação do solo por substâncias tóxicas, objeto de ação civil pública movida pelo Ministério Público do Estado do Paraná. Este trabalho é relevante porque compara as abordagens, indicando suas vantagens e desvantagens.

3.4.2. Análise de Equivalência de Habitat

Uma proposta de abordagem metodológica para avaliação econômica dos recursos naturais degradados em virtude de contaminação de subsolo e de águas subterrâneas baseia-se na **Análise de Equivalência de Habitat** (HEA – *Habitat Equivalency Analysis*), proposta por Roach & Wade (2006) e também apresentada no capítulo 1º.

Tal abordagem foi utilizada para estimar os danos ambientais ao subsolo e águas subterrâneas em virtude de contaminação crônica por vazamento de combustíveis ocorrido em um posto de abastecimento de Porto Alegre, RS⁴⁸.

⁴⁶ Corresponde à soma das parcelas apresentadas na tabela.

⁴⁷ Corresponde ao produto entre o volume de solo contaminado e o custo unitário de remediação da área.

⁴⁸ Conforme descrito no Documento 0785/2017, UAA/GAT/MPRS.

De acordo com esta abordagem, o valor ambiental, V_A , associado ao dano ambiental pode ser estimado por

$$V_A = v_{S,T} a_C \quad (1)$$

Onde $v_{S,T}$ é o valor total dos serviços ambientais por unidade de área degradada e a_C é a área de compensação equivalente à área degradada associada aos serviços ambientais suprimidos.

Segundo o método HEA, a compensação se dá quando o valor presente líquido (VPL) gerado pelos serviços ambientais do habitat degradado iguala-se ao VPL dos serviços ambientais produzidos pela restauração de um habitat equivalente. O modelo que descreve este fundamento pode ser escrito de acordo com a equação (2).

$$f_C v_S a_C = f_D v_S a_D \quad (2)$$

Em (2), v_S é o valor anual dos serviços ambientais por unidade de área, a_D é a área degradada, e f_C e f_D são os fatores anuais que descrevem a evolução financeira ao longo do tempo. Os fatores f_C e f_D são calculados por relações derivadas da matemática financeira e dependem da taxa de juros e dos períodos da degradação e da compensação ambiental. A expressão (2) pode ser rearranjada para escrever a área de compensação em função da área degradada, conforme a equação (3).

$$a_C = \left(\frac{f_D}{f_C} \right) a_D \quad (3)$$

O valor total dos serviços ambientais produzidos pela área de compensação é determinado a partir do valor anual dos serviços ambientais e do respectivo fator financeiro anual aplicado ao período correspondente à compensação. O modelo que descreve esta relação é dado por

$$v_{S,T} = f_C v_S \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4) em (1), obtém-se

$$V_A = f_D v_S a_D \quad (5)$$

Na equação (5), o valor ambiental é uma função de três fatores, o fator financeiro anual da degradação f_D , o valor anual dos serviços ambientais v_S e a área degradada a_D . A seguir são descritos os procedimentos para estimativa de cada um desses fatores:

Valor anual dos serviços ambientais

O valor dos serviços ambientais é estimado por técnicas de avaliação econômica dos recursos naturais, tais como as técnicas descritas na norma da ABNT, NBR 14.653-6⁴⁹. O valor utilizado aqui é de US\$ 6.661,00/ha.ano, ou R\$ 21.981,30/ha.ano⁵⁰, obtido a partir de dado de literatura para os serviços ambientais aplicáveis ao solo em área urbana (COSTANZA et al., 2014).

Área degradada

O valor da área degradada pela contaminação precisa ser estimado. A área conhecida e determinada através dos diagnósticos corresponde à área de interferência a_I . A área degradada é maior que a área de interferência em função da dispersão da contaminação.

Para estimar a área degradada, recorre-se ao trabalho de Narodoslowsky & Krotscheck (1995). Estes autores apresentaram uma formulação para associar uma área de superfície à dissipação de poluentes. Esta relação, dada pela equação (6), pode ser empregada na determinação da área degradada.

$$a_D = \frac{W_P}{\Phi_D} \quad (6)$$

⁴⁹ ABNT NBR 14653-6. Avaliação de bens, parte 6: recursos naturais e ambientais, 2009.

⁵⁰ Considerando US\$ 1,00 = R\$ 3,30, na época da elaboração do laudo.

Em (6), w_P é a carga poluente e Φ_D é o fluxo para dissipação do poluente. A carga poluente pode ser determinada pela equação (7).

$$w_P = C_P u_D a_I \quad (7)$$

Em (7), C_P é a concentração do poluente de referência que identifica a contaminação e u_D é a velocidade de dispersão da contaminação. O fluxo de dispersão do poluente refere-se ao fluxo necessário para diluir a contaminação a um nível suportável. Assim, este fluxo pode ser determinado por

$$\Phi_P = C_L u_D \quad (8)$$

Onde, C_L é a concentração aceitável do poluente na matriz ambiental. No caso em análise, esta concentração refere-se ao respectivo valor de investigação ou valor máximo permitido em águas subterrâneas para o poluente de referência selecionado.

Substituindo (7) e (8) em (6), obtemos uma expressão que relaciona a área degradada à área de interferência, dada por

$$a_D = \left(\frac{C_P}{C_L} \right) a_I \quad (9)$$

A área de interferência considerada nesta avaliação é de aproximadamente 500 m², ou seja, 0,05 ha.

Os valores de C_P e C_L adotados são, respectivamente, 2629,8 µg TPH/L (média de valores obtidos nos poços de monitoramento, considerando zero para valores n.d. ou abaixo do limite de detecção) e 600 µg TPH/L (valor de referência da Lista Holandesa). Assim, a relação C_P / C_L é dada por 4,383 e a área degradada estimada pela eq. (9) resulta em 0,21915 ha.

Fator financeiro anual da degradação

O período considerado na avaliação econômica é compreendido pelo intervalo de tempo entre o ano de 2005 (quando foi inicialmente identificada a contaminação) e o ano atual de 2017. Logo, o período a ser utilizado nesta avaliação é de 12 anos.

O modelo que descreve o fator financeiro a ser aplicado na eq. (5) é apresentado na expressão (10):

$$f_D = \frac{(1+i)^N - 1}{i} \quad (10)$$

Onde (12), $N = 12$ e a taxa de juros i considerada é de 12% a. a. Assim, é obtido o valor $f_D = 24,1331$.

Valor ambiental

A partir dos valores calculados para cada um dos fatores f_D , v_S e a_D , pode-se apresentar um valor estimativo para o dano ambiental. Substituindo esses resultados na expressão (5), é obtido o valor de V_A dado por R\$ 116.254,00.

3.5. Valoração não monetária de poluição ambiental

Até aqui, foram apresentados diversos métodos e estudos de casos de poluição industrial com valoração monetária associada à degradação ambiental ocorrida. Uma abordagem que utiliza indicadores ambientais para equivalência entre compartimentos ambientais degradados e compensados é objeto de pesquisa recente de Hendrich (2019). Essa abordagem metodológica auxilia o desenvolvimento de projetos de compensação a partir da quantificação de potenciais de impacto ambiental associados ao dano, e será apresentada a seguir. Com isso, o dano ambiental pode ser compensado através de melhorias ambientais no processo industrial que ocasionou o dano.

O potencial de impacto ambiental é representado aqui por E . Quando as emissões industriais não excedem os limites máximos estabelecidos, isto é, não extrapolam a capacidade de suporte de ecossistemas, o potencial de impacto ambiental do processo industrial é dado por E_P . Os valores máximos permitidos para as emissões industriais, estabelecidos pela regulação ambiental, também podem ser quantificados por meio de potenciais de impacto ambiental, sendo identificados por E_S . Quando a operação industrial produz emissões cujos valores atingem seus limites estabelecidos, sem ultrapassá-los, tem-se que $E_P = E_S$.

Na medida em que ocorre um dano ambiental, o potencial de impacto ambiental do processo industrial aumenta, atingindo o valor dado por E_D . O dano ambiental persiste por um período de tempo θ_D até que cesse, restaurando o potencial E_S . O dano ambiental pode, assim, ser avaliado em função dos potenciais de impacto ambiental. A medida do dano ambiental é dada por $\Delta E_D \theta_D$ e ΔE_D é calculado por:

$$\Delta E_D = E_D - E_S \quad (2)$$

O dano ambiental medido por $\Delta E_D \theta_D$, após recuperado, constitui um passivo ambiental a ser compensado. De acordo com a proposta metodológica de HEIDRICH (2019), a compensação ambiental pode ser implementada por meio de técnicas que permitam reduzir o potencial de impacto ambiental do processo industrial, abaixo de E_P . Isso significa manter a operação por um período mínimo θ_C pré-estabelecido mediante condições capazes de produzir um potencial de impacto E_{opt} . A Figura 1 mostra uma linha de tempo para o potencial de impacto ambiental de uma atividade industrial, desde a geração do dano ambiental, passando pela restauração dos níveis aceitáveis de impacto e chegando à compensação ambiental.

Na Figura 1, $\Delta E_C \theta_C$ é a medida da compensação ambiental e ΔE_C é dado por:

$$\Delta E_C = E_P - E_{opt} \quad (3)$$

A compensação do dano ambiental é efetivada quando:

$$\Delta E_C \theta_C \geq \Delta E_D \theta_D \quad (4)$$

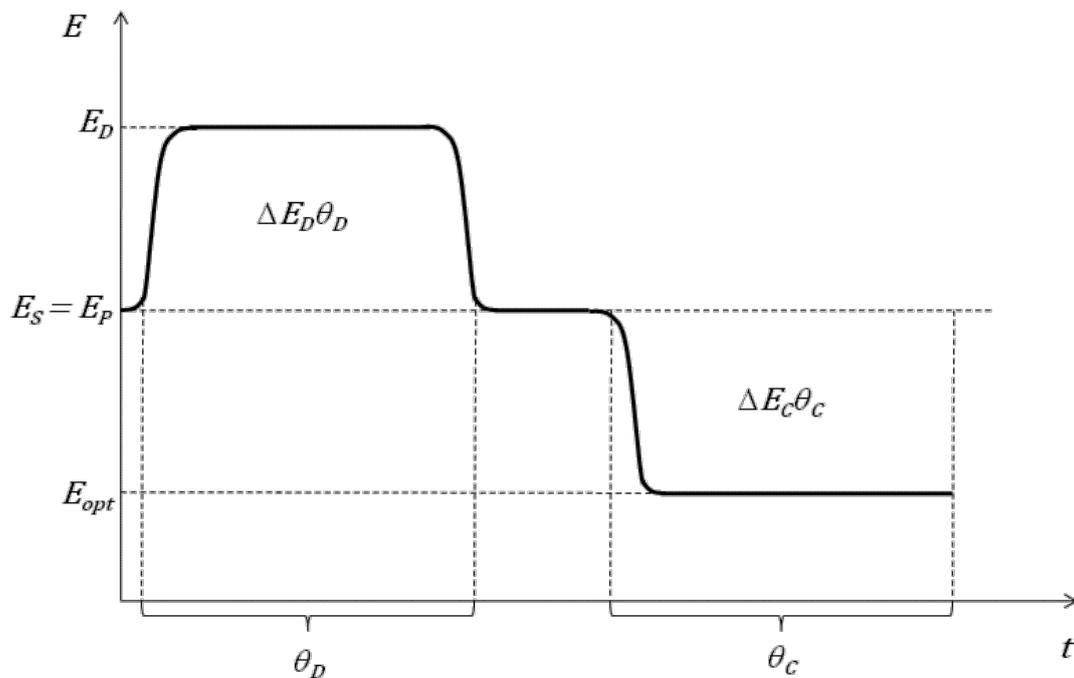


Figura 1. Linha de tempo que descreve as etapas de geração de dano, restauração e compensação ambiental de uma determinada atividade industrial.

Para que a condição dada por (4) seja alcançada, é necessário deslocar o potencial de impacto ambiental do processo industrial para o nível determinado por E_{opt} . Isso é possível mediante a implementação de projetos industriais baseados em técnicas de prevenção da poluição.

Para implementar projetos de compensação ambiental segundo essa metodologia, é necessário executar o seguinte procedimento:

- 1) Escolher uma métrica apropriada para expressar os impactos ambientais em um indicador ou em um conjunto de índices;

- 2) Utilizar a métrica selecionada para converter as emissões industriais responsáveis pelo dano ambiental em um potencial de impacto ambiental E_D ;
- 3) Utilizar a métrica selecionada para converter as emissões industriais usuais do processo em um potencial de impacto ambiental E_P ;
- 4) Utilizar a métrica selecionada para converter as emissões industriais determinadas em LO ou outros instrumentos regulatórios em um potencial de impacto ambiental E_S ;
- 5) Calcular a medida do dano ambiental por $\Delta E_D \theta_D$;
- 6) Selecionar projetos possíveis, com potencial para reduzir os impactos ambientais em níveis inferiores a E_P ;
- 7) Calcular E_{opt} para cada alternativa de projeto;
- 8) Selecionar o menor valor viável para θ_C ;
- 9) Calcular $\Delta E_C \theta_C$ para cada alternativa de projeto;
- 10) Selecionar como projeto de compensação ambiental a alternativa de maior viabilidade econômica, capaz de atender à restrição dada por $\Delta E_C \theta_C \geq \Delta E_D \theta_D$;
- 11) Implementar o projeto e monitorar os resultados.

Tal metodologia foi aplicada em um incidente ambiental de vazamento de gás combustível para a atmosfera ocorrido no ano de 2012 em razão de falha no suprimento de energia elétrica em uma Unidade de Petroquímicos Básicos no município de Triunfo, RS⁵¹.

A empresa investigada apresentou dados relativos aos gases enviados ao *flare* durante a ocorrência ambiental. Esses dados compreendem as vazões de misturas de hidrocarbonetos descarregados e o tempo de duração das descargas.

As informações que podem ser obtidas a respeito do incidente ambiental inviabilizam uma tentativa de associação a valores econômicos que possam expressar o prejuízo ambiental. Seria necessário ainda ter uma informação precisa a respeito da dispersão da pluma de contaminação e sua extensão no ar. O incidente teve curta duração, não sendo efetiva qualquer tentativa de medição de residuais na atmosfera, visto que esses já se dispersaram.

⁵¹ Conforme descrito nos Documentos 0725/2013, 1089/2015 e 0884/2016, UAA/GAT/MPRS.

Entretanto, os dados passíveis de quantificação, fornecidos pela empresa, possibilitam a quantificação do potencial de impacto ambiental na fonte de geração. O potencial de impacto ambiental pode ser avaliado por meio de indicadores que exercem a função de unidade de medida do impacto ambiental.

A partir dos dados disponibilizados pela empresa investigada acerca das emissões geradas durante a ocorrência ambiental, é possível empregar métricas baseadas em categorias de impacto ambiental, usualmente utilizadas na análise de ciclo de vida de produtos e processos (ACV) (AZAPAGIC, 2000). Neste caso, o potencial de impacto ambiental pode ser avaliado por:

$$E_k = \sum_{i=1}^n f_{ki} w_i \quad (4)$$

Onde E_k é o potencial de impacto ambiental da categoria k , f_{ki} é o fator de caracterização da categoria de impacto k para o componente i e w_i é a taxa de emissão do componente i . De acordo com Azapagic (2000), hidrocarbonetos, com exceção de CH_4 , apresentam os fatores de caracterização 0,416 kg etileno/kg HC e 1,7 kg HC^{-1} para as categorias de impacto POCP⁵² e HTP⁵³.

Segundo os dados apresentados, foram emitidos 2355 ton de hidrocarbonetos (HC) para o *flare*. Essas quantidades são excedentes à emissão usual, portanto, podem ser utilizadas para dimensionamento do dano ambiental. Empregando a equação (4), o dano ambiental pode ser calculado para as duas categorias de impacto. Esses resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Cálculo do dano ambiental expresso para as categorias POCP e toxicidade humana.

⁵² Potencial de formação de smog fotoquímico.

⁵³ Potencial de toxicidade humana.

Categoria de impacto	Fator de caracterização <i>f_{ki}</i>	Dano ambiental $\Delta E_D \theta_D$
POCP	0,416 kg etileno/kg HC	979.680 kg etileno
HTP	1,7 kg HC ⁻¹	4.003.500

Fonte: GAT – MP/RS

Depois de calculada a medida do dano ambiental (etapas 1-5), a empresa investigada apresentou dois projetos, implementados no período compreendido entre 2013 e 2015, que resultaram na redução de emissões industriais de hidrocarbonetos e que, portanto, contribuíram com a minimização dos impactos ambientais do processo industrial. As reduções nas emissões industriais foram mensuradas por meio de acompanhamento sobre a redução de perdas no processo industrial.

A metodologia de compensação ambiental proposta foi utilizada pela equipe técnica da empresa investigada para dimensionar o dano ambiental e a compensação obtida com os dois projetos implementados (etapas 6-11). O ganho ambiental obtido com a redução sobre as perdas de hidrocarbonetos foi expresso em unidades de potencial de impacto ambiental e este resultado foi confrontado com o dano ambiental mensurado nas mesmas unidades. Identificou-se uma redução de impacto superior ao dano ocorrido, ratificando a compensação ambiental de acordo com a metodologia proposta.

Diante dos resultados apresentados, observou-se que o ganho ambiental obtido com a implementação dos dois projetos foi superior ao prejuízo associado ao incidente ocorrido em 2012. Desta forma, entende-se que o dano ambiental foi plenamente compensado pela redução sobre índices de potencial de impacto ambiental, obtida ao longo do período compreendido entre os anos de 2013 a 2015.

4. Conclusões

Neste capítulo, foram abordados alguns dos métodos disponíveis para valoração econômica dos danos ambientais decorrentes de eventos de poluição,

retirados de diversos pareceres técnicos elaborados pelo Ministério Público brasileiro, seguindo-se o critério de identificar alternativas compatíveis com os bens jurídicos mais comumente afetados: água, ar e solo.

Para que se possa aferir as parcelas que compõem o Valor dos Recursos Ambientais (VERA) que foram afetadas (Valor de Uso Direto e Indireto + Valor de Opção de Uso Futuro + Valor de Existência), há necessidade de combinar esses métodos com outros que se mostrem adequados para valorar danos à fauna, à flora, à saúde humana e às atividades socioeconômicas e culturais, que também podem ser atingidos pela poluição, sem prejuízo da adoção da Valoração Contingente ou do arbitramento para fixação da indenização por dano moral coletivo.

A escolha do método mais adequado ao caso concreto depende da elaboração de um diagnóstico completo dos bens ambientais lesados pela poluição e dos diversos serviços ecossistêmicos atingidos. É preciso ter clareza sobre o tipo de contaminante lançado no ambiente, dos riscos que ele representa para a biodiversidade e para a saúde humana, da data inicial da produção do dano e da cessação da exposição lesiva, das restrições ao bem-estar coletivo, às atividades econômicas e a direitos fundamentais das pessoas expostas ao evento lesivo durante o período em que perdurou a degradação concreta e as ameaças correlatas. Quanto mais abrangente a informação, maior o êxito da valoração econômica, no que diz respeito à sua proporcionalidade com os fatos da realidade. Muitas vezes, mostra-se necessário um levantamento de informações por meio de pesquisa bibliográfica e de coleta de informações (levantamento de custos de prevenção de poluição, de execução de projetos, de características biológicas do ambiente, etc.), capaz de explicitar os parâmetros e critérios a serem utilizados.

Dado o caráter pluriofensivo da poluição, capaz de ensejar efeitos cumulativos e sinérgicos sobre diversos bens jurídicos protegidos, em múltiplas escalas, é essencial que se tenha clareza a respeito de quais impactos ambientais negativos serão objeto da valoração, em um processo de seleção e de hierarquização, porquanto não será possível valorar economicamente o dano ambiental propriamente dito, em toda a sua complexidade, mas tão somente extrair valores econômicos de bens e serviços que tenham sido lesados, com a perda ou a diminuição de sua oferta para a sociedade.

5. Referências Bibliográficas

AGUIAR, L. V.; FORTES, J. D. N.; MARTINS, E. Neutralização compensatória de carbono – estudo de caso: indústria do setor metal mecânico, Rio de Janeiro (RJ). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, jan/mar 2016, p. 197-205.

ANDREAE, M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, p. 8523-8546, 2019.

AZAPAGIC, A. e PERDAN, S. *Indicators of sustainable development for industry: a general framework*. *Process Safety and Environmental Protection* 78(4): 243-261, 2000.

BERTOLO, R. A., HIRATA, R., & ALY JUNIOR, O. (2019). Método de Valoração da Água Subterrânea Impactada por Atividades Contaminantes no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 33(3), 303–313. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29479>.

CÂMARA, Ana Stela; FERNANDES, Márcia Maria. O Reconhecimento Jurídico do Rio Atrato como Sujeito de Direitos: reflexões sobre a mudança de paradigma nas relações entre o ser humano e a natureza. *Revista de Estudos e Pesquisas sobre as Américas* V.12 N.1 2018 Doi: 10.21057/10.21057/repamv12n1.2018.27788.

CASTRO, A. G. *Estimativa de sequestro de carbono florestal para restauração ecológica devido às emissões de CO₂ na instalação de uma central geradora hidrelétrica – CGH*. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia – Campus Garatinguetá. UNESP, 2017.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Nota Técnica: Tecnologia de Controle – Indústrias de Laticínios (NT 17)**. São Paulo, 1990, 30 p.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARÁ (CBHRP). *Deliberação Normativa Comitê do Rio Pará nº 24*, de 27 de fevereiro de 2013. Divinópolis, 27 de fevereiro de 2013.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução nº 357, 17 de março de 2005*. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamentos de efluentes nos corpos receptores e dá outras providências.

COSTANZA, R., GROOT, R., SUTTON, P., PLOEG, S., ANDERSON, S. J., KUBISZEWSKI, I., FARBER, S., TURNER, R. K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, vol. 26, pgs. 152-158, 2014.

COTRIM, J. *Modelos de valoração econômica de danos ambientais a partir de um estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial. Universidade Federal do Paraná, 2012, 152 f.

DINIZ, Paula Santana. Valoração econômica de danos ambientais decorrentes da emissão de poluentes atmosféricos pelas indústrias de ferro-liga situadas na sub-bacia do Rio Verde Grande (MG) In. *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: CEAFF, 2020, pp. 165-190., pp. 191-221.*
<https://www.mpmg.mp.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A91CFA97940B1990179416D10A51CA2>, pp. 221, acesso em 03 de jun. 2021.

FLIZIKOWSKI, L. C. *Estimativa de emissões de dióxido de carbono na construção civil e neutralização com espécies vegetais: um estudo de caso*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal. UFPR, 2012.

HAWROT-PAW, M.; KONIUSZY, A.; ZAJAC, G.; SZYSZLAK-BARGLOWICZ, J. Ecotoxicity of soil contaminated with diesel fuel and biodiesel. *Scientific Reports – Nature Research*, 10:16436, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73469-3>. Acessado em 06 de janeiro de 2021.

GRACIANO, V. A.; PIRES, C. S.; TEIXEIRA, S. C. G.; ZIOLLI, R. L.; PÉREZ, D. V. *Remediação de um solo contaminado com petróleo por oxidação química*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1656-1660, 2012.

HEIDRICH, Alencar. *Metodologias para Projeto de Processos Químicos na Solução de Problemas Ambientais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

KASKANTZIS NETO, Georges. Desempenho de modelos de valoração econômica de danos ambientais decorrentes da contaminação do solo: CATES, VCP, HEA, DEPRN. In *MPMG Jurídico*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais. Edição especial Meio Ambiente. 2011, pp. 31-37. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A91CFA942729E930142998EFF7066B8>, acesso em 03 jun. 2021.

MA, C.Q.; REN, Y.S.; ZHANG, Y.J; SHARP, B. The allocation of carbon emission quotas to five major power generation corporations in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 189, p. 1-12, 2018.

MACHADO. R. M. G.; FREIRE, V. F.; SILVA, P. C.; FIGUERÊDO, D. V.; FERREIRA, P. E. Minas Ambiente. *Controle Ambiental nas Pequenas e Médias Indústrias de Laticínios*. SEGRAC: Belo Horizonte, 224 p., 2002.

MENEGHETTI, L. R. R. *Bioremediação na descontaminação de solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007, 113 f.

MILHEMEM, M. M. *Emissões de dióxido de carbono e compensação ambiental com plantio de espécies arbóreas nativas do cerrado: um estudo de caso*. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Planaltina. UNB, 2012.

MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa conjunta COPAM/CERH nº 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.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MATO GROSSO. Inquérito civil n. 000314-061/2019. Relatório Técnico n. 271/2020, de 04 de setembro de 2020

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. Nota Técnica do Ministério Público do Mato Grosso do Sul, disponível em: <https://www.mpms.mp.br/downloads/assecom/metodologia-valoracao-parte-ii.pdf>, acesso em 03 de maio de 2021.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. SEI nº 29.0001.0018820.2018-51 Parecer Técnico nº 459251 Ação Civil Pública nº 1097053-96.2016.8.26.0100 da 11ª Vara de Fazenda Pública.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Centro de Apoio Operacional à Execução. Inquérito Civil 25/2008. Parecer LT 1809/15 CAEX, datado de 27 nov. 2015.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. INFORMAÇÃO TÉCNICA Nº. 502/2019.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Informação Técnica 1103/2019.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Unidade de Assessoramento Ambiental. Gabinete de Assessoramento Técnico. Documentos 1039/2018 e 0370/2019.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Unidade de Assessoramento Ambiental. Gabinete de Assessoramento Técnico. Documento DAT-MA 0360/2010.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Unidade de Assessoramento Ambiental. Documentos 0086/2019 e 0016/2021.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. 4ª. Câmara de Coordenação e Revisão. *Valoração de Danos em matéria de meio ambiente e de patrimônio cultural*. Roteiros para vistoria expedita e perícia multidisciplinar em procedimentos do Ministério Público Federal. Disponível em http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/publicacoes/roteiros-da-4a-ccr/copy2_of_14_006_dia_mundial_do_meio_ambiente_2_Livreto_ONLINE_CCR4_101.pdf, acesso em 16 fev. 2021.

MOTTA, Ronaldo Seroa da. *Economia Ambiental*. RJ: FGV Editora, 2006.

NARODOSLAWSKY, M., KROTSCHECK, C. The sustainable process index (SPI): evaluating processes according to environmental compatibility. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 41, pg. 383-397, 1995.

ODUM, Howard T. *Environmental accounting, emergy and decision making*. New York: Wiley, 1996. 370 p.

OLIVEIRA, S. G. L.; Vasconcelos, N. V. C.; Gouvinhas, R. P.; Ramos, D. S. Estudo da viabilidade da neutralização das emissões de gases do efeito estufa: estudo de caso em uma empresa logística. *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. São Carlos, SP, Brasil, 12 a 15 de outubro de 2010.

ORTEGA, Enrique. *Contabilidade e diagnóstico de sistemas usando os valores dos recursos expressos em emergia*. Campinas: UNICAMP/DEA, 2000a. 38 p.

ORTEGA, Enrique. 2002. *Contabilidade e diagnóstico de sistemas usando os valores dos recursos expressos em emergia*. Departamento de Engenharia de Alimentos UNICAMP -Universidade Estadual de Campinas. SP, Brasil.

PARAÍSO, M. L. S. Metodologias de avaliação econômica dos recursos naturais. *Revista Direito Ambiental*, **6**, 97-107 (1997).

REGINATTO, C. *Bioventilação em um solo argiloso contaminado com mistura de diesel e biodiesel*. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012, 111 f.

ROACH, B.; WADE, W. W. Policy evaluation of natural resource injuries using habitat equivalency analysis. *Ecological Economics*, v. 58, p. 421-433, 2006.

SCHÖNGART, J.; ARIEIRA, J.; FORTES, C. F.; et al. Carbon dynamics in aboveground coarse wood biomass of wetland forests in the northern Pantanal, Brazil. *Biogeosciences Discussion*, v. 5, p. 2103-2130, 2008.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva; DINIZ, Paula Santana; SILVA, Luís Fernando de Moraes. Valoração dos danos aos recursos hídricos em Brumadinho. *Dom Helder Revista de Direito*, v. 3, n. 6, maio/ago. 2020, p. 191-217.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva. Valoração do dano ocasionado pelo lançamento de esgotos sanitários in natura gerados em Divinópolis/MG no Rio Itapeçerica e correspondente medida de compensação ambiental. *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., pp. 191-221. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A91CFA97940B1990179416D10A51CA2>, pp. 221, acesso em 03 de jun. 2021. acesso em 03 de jun. 2021.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva; DINIZ, Paula Santana e SILVA, Luís Fernando de Moraes. Valoração dos danos aos recursos hídricos decorrentes dos resíduos da barragem de mineração em Brumadinho – MG. In 2º. CONRESOL. 2º. *Congresso Sul-americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*, Foz do Iguaçu, 28 a 30 de maio de 2019.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva. SILVA, Luís Fernando de Moraes. Valoração de dano ambiental ocasionado pelo lançamento irregular de efluentes de laticínio em curso de água. *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, pp. 235-238. Disponível em: https://www.cnmp.mp.br/portal/images/CMA/valoracao/Valoracao_economica_de_danos_ambientais_-_CEAT.pdf, pp. 221.

VALLE, Manuel Castañón. *Valoración del Daño Ambiental*. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – Oficina Regional para a América Latina e o Caribe. Cidade do México, 2006, pp. 64-69.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 2014.