

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTUDO DE DEFINIÇÃO DO LIMITE DE ECOTOXICIDADE PARA O EFLUENTE TRATADO LANÇADO NO MAR DE UMA INDÚSTRIA NO SUDESTE DO BRASIL

Chagas, K.¹; Barbiero, D.C.B.¹; Andrade, D.P.¹; Furley, T.H.¹

Abstract: The management of industrial effluents in coastal environments represents a major challenge for sustainable development in marine areas. This study aimed to define maximum acceptable limits for acute and chronic toxicity of effluent discharged into marine waters, using hydrodynamic dispersion modeling and ecotoxicological criteria based on the Effluent Concentration in the Receiving Body (CECR), in accordance with Brazilian regulations (CONAMA Resolutions 430/2011 and 357/2005). Numerical simulations conducted under typical seasonal conditions (summer and winter) enabled the characterization of the mixing zone and the determination of conservative CECR values. These values supported the establishment of ecotoxicity limits that ensure the protection of aquatic life.

Resumo: A gestão de efluentes industriais em ambientes costeiros representa um grande desafio para o desenvolvimento sustentável em áreas marinhas. Este estudo teve como objetivo definir limites máximos aceitáveis para toxicidade aguda e crônica de efluentes lançados em águas marinhas, utilizando modelagem de dispersão hidrodinâmica e critérios ecotoxicológicos baseados na Concentração de Efluente no Corpo Recebedor (CECR), de acordo com a regulamentação brasileira (Resolução CONAMA 430/2011). Simulações numéricas conduzidas em condições sazonais típicas (verão e inverno) permitiram a caracterização da zona de mistura e a determinação de valores de CECR conservadores. Esses valores subsidiaram o estabelecimento de limites de ecotoxicidade que garantem a proteção da vida aquática.

Palavras-Chave – Toxicidade aguda e crônica; Concentração do Efluente no Corpo Receptor.

1) Aplysia Assessoria e Consultoria. Rua: Júlia Lacourt Penna 335, Vitória, ES. Telefone: (27) 33374877. Email: katia@aplysia.com.br.

INTRODUÇÃO

A gestão de efluentes industriais em ambientes costeiros representa um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável em zonas marinhas e estuarinas. A despeito da existência de marcos regulatórios nacionais, como a Resolução CONAMA 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, lacunas ainda persistem no tocante à definição de critérios específicos para ecotoxicidade em ambientes marinhos (BRASIL, 2011). Em geral, os limites estabelecidos pela legislação se aplicam de forma mais direta a corpos d'água interiores, como rios e córregos, sendo necessário, em ambientes marinhos, recorrer a estudos específicos de dispersão e diluição do efluente para estimar sua influência no corpo receptor (GARCIA et al., 2020).

Dentre os parâmetros ambientais utilizados na avaliação da aceitabilidade do lançamento de efluentes no ambiente marinho, destaca-se a Concentração do Efluente no Corpo Receptor (CECR), definida como a fração do efluente diluída no ponto de interesse do corpo d'água (US EPA, 1991). A CECR é utilizada para definir limites de toxicidade com base na exposição real dos organismos aquáticos, representando uma abordagem mais realista e ecologicamente relevante do que a simples comparação direta com valores de laboratório. Assim, para que sejam definidos limites de toxicidade aguda e crônica aceitáveis, é necessário compreender o comportamento da pluma do efluente, considerando fatores hidrodinâmicos locais, como marés, ventos e batimetria (PETTER et al., 2019).

Estudos de modelagem de pluma de efluentes têm sido cada vez mais empregados como ferramenta de apoio à tomada de decisão ambiental. Esses modelos possibilitam simular a trajetória e a dispersão do efluente após seu lançamento, fornecendo subsídios técnicos para a definição de áreas de mistura e para a avaliação de impactos potenciais à biota aquática (LOUREIRO et al., 2021). Além disso, esses estudos são fundamentais para o estabelecimento de limites de toxicidade baseados em critérios ecológicos e na proteção dos usos preponderantes do corpo hídrico.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de definição de limites máximos de toxicidade aguda e crônica para efluente industrial lançado em ambiente marinho, com base em estudo de dispersão e avaliação da CECR. Esse trabalho visa contribuir para o aprimoramento dos critérios técnicos aplicados ao licenciamento ambiental de empreendimentos costeiros, promovendo a compatibilização entre desenvolvimento industrial e proteção do meio marinho.

METODOLOGIA

Os aspectos legais estabelecidos a respeito da ecotoxicidade de efluentes lançados em ambiente marinho será aplicado sobre os resultados de dois cenários (cenário típico de inverno, cenário típico de verão) gerados no estudo de dispersão da pluma do efluente, visando avaliar a capacidade de assimilação da carga de ecotoxicidade do efluente tratado com base na diluição da pluma de efluente lançado.

Para avaliar a diluição do efluente e a sua capacidade de dispersão na zona costeira, subsidiando o cálculo da concentração do efluente no corpo receptor (CECR), foi realizado, previamente, o estudo de modelagem da dispersão da pluma do efluente. Essa modelagem foi realizada utilizando o sistema SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). O modelo computacional foi alimentado com dados primários e secundários referentes à região de estudo, como batimetria, dados de maré, correntes, vazão de efluente, qualidade da água, condições de vento e temperatura. Foram simulados cenários representativos das condições típicas de inverno e verão, com o objetivo de identificar o comportamento da pluma de efluente sob diferentes condições meteoceanográficas.

A partir dos resultados da modelagem, para a definição da concentração do efluente no corpo receptor (CECR), foram considerados os aspectos estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011. Como referência técnica complementar, utilizou-se o Manual de Controle Ecotoxicológico de Efluentes Líquidos no Estado de São Paulo (CETESB, 2008), cuja base normativa é aplicável ao contexto nacional, incluindo o estado do Espírito Santo.

Foram aplicados três critérios para análise da ecotoxicidade, de acordo com o artigo 18 da Resolução CONAMA 430/2011, para ensaios ecotoxicológicos crônicos (1) e agudos (2 e 3):

$$\text{Concentração do efluente no corpo receptor (CECR)} \leq CENO \quad (1)$$

$$\text{Concentração do efluente no corpo receptor (CECR)} \leq \frac{CL50}{10} \quad (2)$$

$$\text{Concentração do efluente no corpo receptor (CECR)} \leq \frac{30}{FT} \quad (3)$$

Para aplicação dos critérios ecotoxicológicos relacionados ao lançamento de efluentes no mar foram considerados os resultados gerados no estudo de modelagem computacional, por englobarem diferentes cenários e permitirem a avaliação da pluma de dispersão sobre diferentes condições meteoceanográficas, incluindo aquela consideradas como críticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas no estudo modelagem da dispersão da pluma do efluente indicaram que durante o verão, a predominância de ventos do quadrante norte/nordeste direciona a pluma para o sul da área de influência, enquanto no inverno, sob influência de ventos do sul/sudeste, a pluma tende a se deslocar para o norte, alcançando eventualmente áreas sensíveis como a região de captação de água. Por outro lado, no inverno, quando os ventos mais fortes sopram do quadrante sul/sudeste, a dispersão dos efluentes se dirige para o norte da área, podendo alcançar o canal de captação. A avaliação térmica da pluma estabeleceu que a variação de temperatura no limite da zona de mistura não deve ultrapassar 3°C em relação à temperatura média do corpo receptor, que foi de 22,03°C nos cenários modelados, resultando em um limite máximo de 25°C.

Águas com temperaturas superiores a esse limite permanecem predominantemente restritas a um raio de até 500 metros do ponto de lançamento. No entanto, em situações meteorológicas críticas, essa influência térmica pode se estender até aproximadamente 1 km tanto para o norte quanto para o sul da área de lançamento, a depender da direção e intensidade dos ventos. Assim, para garantir a conformidade com a legislação e assegurar a proteção ecológica do corpo receptor, foi proposto o estabelecimento de uma zona de mistura com raio de até 1 km a partir do ponto de lançamento.

A partir da delimitação dessa zona, aplicaram-se os critérios de avaliação ecotoxicológica para definir os limites máximos aceitáveis de toxicidade aguda e crônica, assegurando a inexistência de efeitos adversos em organismos aquáticos e a manutenção dos usos preponderantes da água marinha na região de influência direta do efluente.

A concentração do efluente no corpo receptor (CECR) indicou que, em ambos os cenários simulados, as condições de lançamento podem atender aos critérios legais desde que observadas as diluições previstas na zona de mistura. Dessa forma, os limites máximos de toxicidade aguda e crônica admissíveis para o efluente foram determinados de maneira a garantir a proteção dos organismos aquáticos e a conformidade com os padrões normativos vigentes.

Os resultados apresentados na Tabela 1, demonstraram que na distância de 1km ao norte as concentrações percentuais médias do efluente na zona costeira variaram entre as concentrações de 4,28% (Fator de Diluição = 23,36) para o cenário de verão e de 9,97% (Fator de Diluição = 10,03) para cenário de inverno. Para a distância de 1km ao sul os resultados mostraram concentrações

percentuais médias na zona costeira variando de 8,88% (Fator de Diluição = 11,26) a 9,54% (Fator de Diluição = 10,48) para os cenários de verão e inverno, respectivamente.

Tabela 1 – Distribuição da média da diluição do efluente

Comprimento da Pluma	Cenário			
	Típico de Inverno		Típico de Verão	
	FD	Concentração	FD	Concentração
1 km norte	10,03	9,97	23,36	4,28
1 km sul	10,48	9,54	11,26	8,88

Legenda: FD = Fator de diluição.

É importante ressaltar que o fator de diluição representa o número de vezes que uma solução original foi diluída. Assim, a diluição de uma solução sempre resulta na diminuição da sua concentração percentual. Ou seja, o fator de diluição indica a proporção entre o volume final da solução diluída e o volume inicial da solução original.

Com objetivo de ser mais restritivo indica-se a menor diluição do efluente no corpo receptor obtida dentre todos os cenários avaliados na modelagem computacional como o limite de ecotoxicidade. Dessa forma, para o valor da CECR foi considerado o cenário típico de inverno ao norte.

Como para o estado do Espírito Santo não há legislação específica que disponha sobre os critérios de ecotoxicidade, o limite máximo de ecotoxicidade no efluente deve seguir as diretrizes dispostas na Resolução CONAMA 430/2011, parágrafo 3º do artigo 18, em resumo: $CECR \leq CENO$, $CECR \leq CL50/10$ e $CECR \leq 30/FT$.

Dessa forma, na Tabela 2 estão descritas as condições de conformidade de acordo com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 para o efluente tratado. Onde, para o estabelecimento da toxicidade crônica o valor da concentração de efeito não observado (CENO) deverá ser maior ou igual a 9,97%. Para efeito agudo deverá ser permitido concentração de efeito a 50% dos organismos (CL50%) maior ou igual a 99,7% e fator de toxicidade (FT) menor ou igual a 3. Vale ressaltar que para estabelecimento dos valores acima foram utilizadas as fórmulas preconizadas na Resolução CONAMA Nº 430/2011, parágrafo 3º do artigo 18.

Tabela 2 – Tabela resumo com condição de conformidade de acordo com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 para o efluente tratado considerando o cenário menos conservador.

	Tipo de Teste	Resultado	Condição	CECR
Cenário menos conservador	Crônico	CENO		9,97%
		CE50% / 10	≥	99,7%
	Agudo	30 / FT		3

Legenda: CENO: Concentração de não efeito observado; CE50%: concentração de efeito a nível de 50%; FT: fator de toxicidade; CECR: concentração do efluente no corpo receptor.

Após a determinação do limite de ecotoxicidade (CECR) foram avaliados dados dos ensaios ecotoxicológicos com os organismos *Echinometra lucunter*, *Skeletonema costatum* e *Vibrio fischeri* (Jul/23 a Ago/24). O monitoramento realizado após o mês de Julho de 2023 reflete o período pós dragagem do canal. A avaliação ecotoxicológica foi realizada com os dados obtidos após a dragagem do canal para desconsiderar a influência dessa atividade nos resultados. Estão apresentados na Tabela 3, os resultados obtidos considerando o cenário mais conservador.

Tabela 3 – Tabela resumo com condição de conformidade de acordo com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 para o efluente tratado considerando o cenário mais conservador.

	Tipo de Teste	Resultado	Condição	CECR
Cenário mais conservador	Crônico	CENO		4,28%
		CE50% / 10	≥	42,8%
	Agudo	30 / FT		7

Para fins comparativos, na Figura 1 observa-se que para *E. lucunter* e *S. costatum* todos os ensaios crônicos realizados para os dois organismos estiveram em conformidade com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 considerando o valor da CECR, ou seja, CENO ≥ CECR, assim como nos ensaios agudos com a bactéria bioluminescente *V. fischeri*, realizados no período de Jul/23 a Ago/24, que ficaram em conformidade com a legislação, considerando o valor da CECR, ou seja, FT ≥ CECR, sendo esse o mesmo resultado obtido para o cenário menos conservador (Figura 2).

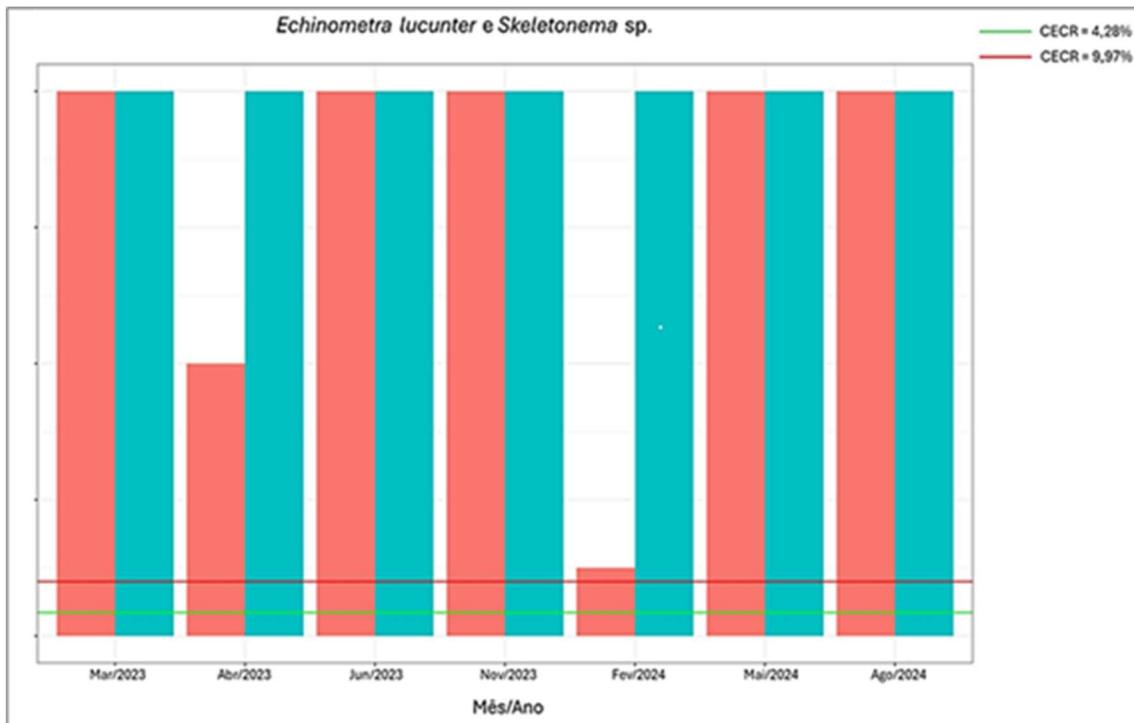


Figura 1 - Gráfico de barras dos resultados obtidos nas análises ecotoxicológicas com organismos *E. lucunter* e *Skeletonema* sp. para efluente final no período de 2023 a 2024. Legenda: CENO = Concentração de Efeito Não Observado; CECR = Concentração do Efluente no Corpo Receptor; traço vermelho representa o valor da CECR = 9,97% (cenário menos conservador); traço verde representa o valor da CECR = 4,28% (cenário mais conservador).

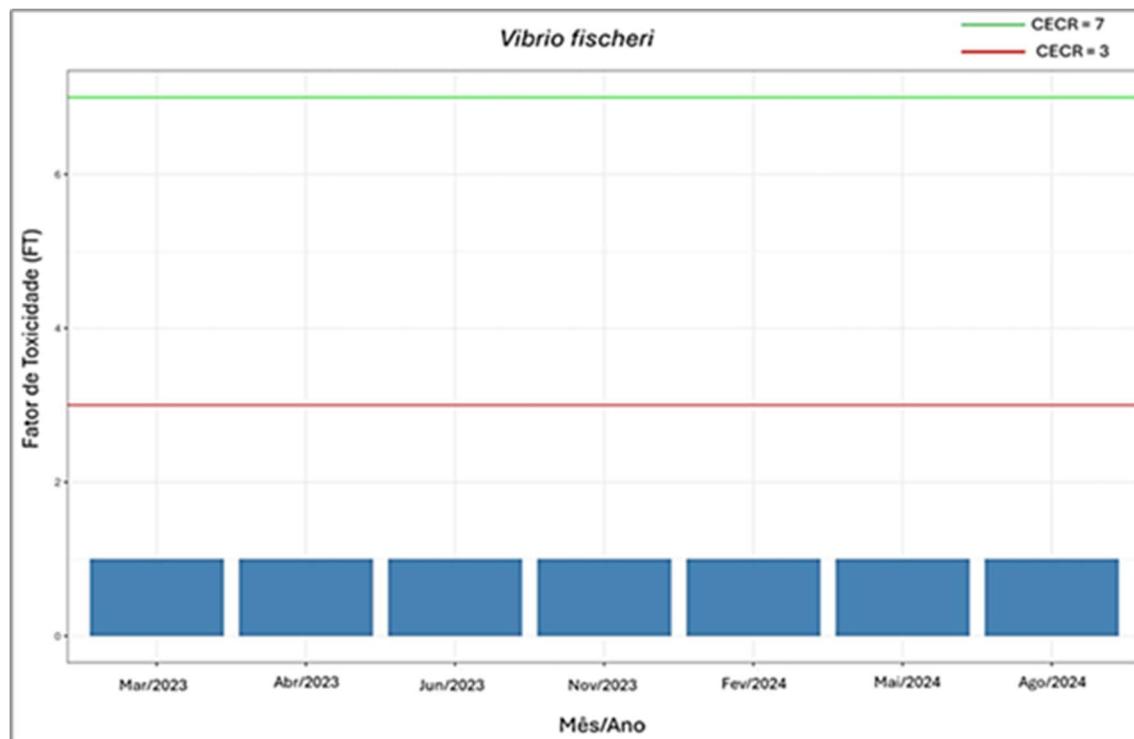


Figura 2 – Gráfico de barras dos resultados obtidos nas análises ecotoxicológicas com organismos *V. fischeri* para efluente final no período de 2023 a 2024. Legenda: FT = Fator de Toxicidade; CECR = Concentração do Efluente no Corpo Receptor; traço vermelho representa o valor da CECR = 3 (cenário menos conservador); traço verde representa o valor da CECR = 7 (cenário mais conservador).

CONCLUSÃO

A definição dos limites para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, quando fundamentada em estudos de modelagem de dispersão, representa uma medida essencial para garantir a preservação da qualidade da água e a integridade dos ecossistemas aquáticos. A estimativa das taxas de diluição na zona de mistura, obtida por meio desses estudos, oferece subsídios técnicos consistentes para o estabelecimento de critérios de lançamento ambientalmente seguros, assegurando a conformidade com a legislação vigente e promovendo uma gestão responsável dos recursos hídricos.

As simulações hidrodinâmicas e de transporte de massa realizadas, com base em condições médias de diluição ao longo de um período de 30 dias e considerando os regimes sazonais de inverno e verão, demonstram uma abordagem robusta para representar a variabilidade ambiental. A incorporação das diferentes condições hidrológicas e meteorológicas permitiu o comportamento da dispersão do efluente no corpo receptor. Os resultados obtidos quanto aos limites de lançamento indicam que estes são suficientemente conservadores para atender aos padrões estabelecidos na Resolução CONAMA 430/2011, garantindo, assim, a proteção da qualidade da água e a preservação dos ecossistemas aquáticos em toda a área de influência do lançamento.

Considerando o monitoramento do efluente tratado, realizado no período de Jul/23 a Ago/24 não foram observadas desconformidades em relação à legislação para os três organismos avaliados, tanto para os ensaios crônicos quanto para os agudos. Dessa forma estiveram em conformidade com a Resolução CONAMA Nº 430/2011 considerando o valor da CECR, mesmo no cenário menos conservador.

Assim, os limites de lançamento definidos com base na modelagem de dispersão foram considerados ambientalmente seguros, por terem sido estabelecidos a partir de critérios técnicos e de uma análise abrangente das condições de dispersão.

Portanto, conclui-se que os parâmetros estabelecidos para o lançamento de efluentes mostram-se compatíveis com os princípios da precaução e da sustentabilidade ambiental, contribuindo para o equilíbrio entre o desenvolvimento das atividades antrópicas e a preservação dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) (2008). Controle ecotoxicológico de efluentes líquidos no estado de São Paulo / Eduardo Bertoletti. São Paulo : 42 p. Série Manuais. ISSN 0103-2623.

GARCIA, C. A. B. et al. (2020) Ecotoxicological criteria for effluent discharge in coastal areas: *regulatory challenges and scientific approaches*. Environmental Science and Policy, v. 112, p. 183–191.

LOUREIRO, S.; OLIVEIRA, C.; MONTEIRO, R. J. S. (2021) *Marine effluent plumes: modelling and ecological implications for coastal environmental licensing in Brazil*. Ocean & Coastal Management, v. 204, p. 105498.

PETTER, C. O. et al. (2019) *Aplicações de modelos de dispersão para o licenciamento ambiental de lançamentos submarinos de efluentes*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, e8.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA) (1991). *Technical Support Document for Water Quality-based Toxics Control*. EPA/505/2-90-001, Washington, D.C.