

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE APLICADA AO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

AUTORES:

Rafaela Gonçalves de Almeida^{1,2*}, Bruna Cerati Carvalho¹, Henrique Rogerio Antunes de Souza Junior², Sebastião Roberto Soares¹

INSTITUIÇÃO:

¹Grupo de Pesquisa em Avaliação de Ciclo de Vida (CICLOG), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ²EnCiclo Soluções Sustentáveis.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE APLICADA AO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

Resumo

O Brasil possui um vasto número de reservas de petróleo, predominantemente localizadas em regiões *offshore*, com produção diária de milhares de barris. A exploração e a extração de petróleo envolvem processos cujos impactos ambientais são considerados significativos, tanto no que tange às atividades relacionadas à perfuração quanto ao encerramento de poços. Os resíduos gerados protagonizam entre os impactos associados à atividade, com destaque para os cascalhos de perfuração, que se caracterizam por fragmentos de rocha que chegam à superfície com fluidos de perfuração e outros contaminantes aderidos (*e.g.*, hidrocarbonetos oriundos do petróleo). Para compreender a dimensão desses impactos e contribuir para a tomada de decisões no setor petrolífero, utiliza-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa metodologia abrange a análise de todo o ciclo de vida do produto, desde a extração até a destinação final dos e fim-de-vida dos resíduos. A etapa de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), é crucial para identificar limitações nos dados, que servirão como base para quantificação de impactos conforme a categoria de impacto selecionada, na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV). O escopo deste estudo visa investigar como características físicas e químicas dos cascalhos de perfuração descartados no mar influenciam na categoria de impacto “ecotoxicidade marinha”, utilizando o método de AICV LC-IMPACT, para modelagem no *software* SimaPro 9.4.0.1. A análise de sensibilidade é realizada para avaliar a variabilidade dos resultados, garantindo a confiabilidade dos dados de entrada selecionados para o escopo do estudo. Desse modo, foram estabelecidos diferentes cenários: os valores médios de compostos químicos nos cascalhos areníticos e carbonáticos, caracterizados com a presença de Fluidos de Perfuração de Base Aquosa (FPBA) ou Fluidos de Perfuração de Base não Aquosa (FPBNA) foram definidos como *baseline* neste estudo a nível de ICV. Concentrações mínimas e máximas foram determinadas, permitindo a identificação dos principais desvios em relação ao *baseline*, como parâmetros-chave para avaliar como elas refletem nos impactos ambientais. O Alumínio foi identificado como o elemento mais impactante em 75% dos cenários devido à sua alta sensibilidade. O Bário se destaca nos cenários 1 e 4, onde as concentrações são 35 e 41 vezes maior que o Alumínio, respectivamente. Outros metais como Pb, Zn, Ni, Mn, Cu e Cr, embora apresentem potenciais efeitos adversos na ecotoxicidade marinha, que refletem em FCs de caracterização para a categoria, contribuem com menos de 0,1% dos impactos. A variabilidade nos impactos entre cenários destaca a necessidade de gerenciar cuidadosamente as concentrações de substâncias tóxicas, especialmente do Alumínio, para mitigar os impactos ambientais. Recomenda-se a utilização de modelagem para lidar com incertezas que identificam parâmetros críticos e a atribuição de distribuições de probabilidade adequadas, como distribuições normais, em resultados futuros.

Palavras-chave: Perfuração *offshore*; cascalhos de perfuração; Avaliação do Ciclo de Vida; Análise de sensibilidade.

Abstract

Brazil has a vast number of oil reserves, predominantly located in offshore regions, with a daily production of thousands of barrels. The exploration and extraction of oil involve processes whose environmental impacts are considered significant, both in terms of drilling activities and well decommissioning. The waste generated is among the associated impacts, with drill cuttings being particularly noteworthy. These cuttings are fragments of rock that reach the surface with drilling fluids and other adhered contaminants (*e.g.*, hydrocarbons from oil). To understand the extent of these impacts and contribute to decision-making in the oil sector, Life Cycle Assessment (LCA) is used. This methodology encompasses the analysis of the entire life cycle of the product, from extraction to the final disposal and end-of-life of the waste. The Life Cycle Inventory (LCI) phase is crucial for identifying data limitations, which will serve as the basis for quantifying impacts according to the selected impact category in the Life Cycle Impact Assessment (LCIA). The scope of this study aims to investigate how the physical and chemical characteristics of drill cuttings discarded at sea influence the "marine ecotoxicity" impact

category, using the LC-IMPACT method, for modeling in the SimaPro 9.4.0.1 software. Sensitivity analysis is performed to evaluate the variability of the results, ensuring the reliability of the input data selected for the study scope. Different scenarios were established: the average values of chemical compounds in sandstone and carbonate cuttings, characterized by the presence of Water-Based Drilling Fluids (WBDF) or Non-Aqueous Drilling Fluids (NADF), were defined as the baseline in this LCI-level study. Minimum and maximum concentrations were determined, allowing for the identification of major deviations from the baseline, as key parameters to assess how they reflect on environmental impacts. Aluminum was identified as the most impactful element in 75% of the scenarios due to its high sensitivity. Barium stands out in scenarios 1 and 4, where its concentrations are 35 and 41 times higher than Aluminum, respectively. Other metals such as Pb, Zn, Ni, Mn, Cu, and Cr, although they present potential adverse effects on marine ecotoxicity, which reflect in characterization factors for the category, contribute less than 0.1% of the impacts. The variability in impacts between scenarios highlights the need to carefully manage the concentrations of toxic substances, especially Aluminum, to mitigate environmental impacts. It is recommended to use modeling to deal with uncertainties that identify critical parameters and assign appropriate probability distributions, such as normal distributions, in future results.

Keywords: Offshore drilling; drill cuttings; Life Cycle Assessment; sensitivity analysis.

Introdução

O Brasil possui um vasto número de reservas de petróleo, predominantemente localizadas em áreas *offshore*, gerando aproximadamente 3 milhões de barris por dia (ANP, 2022). Os ecossistemas dessas regiões, no entanto, compreendem vasta riqueza em termos da biodiversidade, sendo eles os manguezais, restingas, ilhas, baías, estuários, recifes de corais, entre outros ambientes que abrigam diversas espécies flora e fauna (MMA, 2016).

A exploração de petróleo envolve processos com impactos ambientais significativos, tanto na perfuração quanto no encerramento dos poços. Durante a perfuração, os resíduos gerados, como cascalhos e fluidos de perfuração, são potenciais causadores desses impactos. Os fluidos de perfuração são misturas complexas que mantêm a estabilidade da formação rochosa e facilitam a extração de petróleo (Amorim, 2003). Existem dois tipos principais de fluidos de perfuração: de base aquosa (FPBA) e de base não aquosa (FPBNA). Os FPBA, amplamente utilizados, são compostos por água e diversos aditivos, enquanto os FPBNA são preferidos em condições de alta temperatura e pressão devido à sua alta estabilidade térmica e versatilidade (Caenn; Chillingar, 1996; Vasconcelos, 2022).

Os fluidos associados aos cascalhos durante o processo de perfuração, quando não manejados adequadamente, podem provocar mudanças químicas e físicas na composição dos sedimentos no leito marinho e na fauna local (IOGP, 2016). Sendo assim, o conhecimento acerca da composição mineralógica e química dos cascalhos com fluidos aderidos se torna crucial para compreender o comportamento desses resíduos ao se acumularem no ecossistema marinho. Segundo Fagundes (2018), a correta identificação e classificação dos cascalhos de perfuração contribui de maneira decisiva na compreensão da história deposicional de uma bacia sedimentar. Essa abordagem também permite avaliar a localização de acumulações de hidrocarbonetos, além de agregar informações importantes sobre a estabilidade e integridade do poço.

Para mitigar os danos associados a essa atividade, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) instituiu a Instrução Normativa nº 01/2018, para regulamentar o correto descarte de cascalhos de perfuração. No entanto, a norma foi temporariamente suspensa, para definição dos padrões de lançamento em águas marinhas que melhor representem o cenário.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é usada para quantificar os impactos ambientais potenciais de um produto ou atividade. Dessa forma, a ACV é capaz de qualificar o desempenho ambiental de produtos e processos, adotando uma abordagem *cradle-to-grave*, que analisa insumos necessários desde o processo de extração de matéria-prima até a destinação final do produto. A ACV envolve quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (ABNT, 2009a).

O inventário fornece dados essenciais para quantificar e avaliar impactos ambientais, como o consumo de recursos naturais e emissões de poluentes. A associação desses dados a categorias de impacto específicas define a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV). Para assegurar a robustez do estudo, o Centro de Pesquisa da Comissão Europeia (2010) recomenda a análise de sensibilidade, especialmente na etapa de inventário do ciclo de vida (ICV). Ao estabelecer limitações e incertezas quanto aos dados de entrada da ICV, a análise de sensibilidade auxilia na interpretação dos resultados da AICV (Rosenbaum et al., 2018).

Nesse contexto, o escopo deste estudo visa analisar de que maneira as características físicas e químicas dos cascalhos de perfuração descartados no mar influenciam na categoria de impacto de ecotoxicidade marinha, por meio da análise de sensibilidade de resultados da AICV. Nesta análise, serão atribuídas diferentes concentrações para cada parâmetro avaliado de modo que cada valor de concentração configura um cenário na AICV. Além disso, pretende-se realizar a análise de impacto de toda a cadeia de produção de cascalho, desde a obtenção do fluido até a destinação no mar, a fim de avaliar como a contribuição do fluido e outros processos influenciam nos impactos tanto do cascalho, quanto nos impactos totais.

Metodologia

Esse estudo visa fornecer informações para a tomada de decisões sobre a gestão de fluidos e cascalhos de perfuração, com foco nas indústrias de petróleo e partes interessadas. Analisando os processos de perfuração desde a obtenção das matérias-primas, uso dos fluidos e insumos, tratamentos dos cascalhos nas plataformas *offshore*, até a destinação final no mar, o estudo oferece uma visão abrangente dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos cascalhos de perfuração. As rotas de tratamento terrestre não estão incluídas na análise.

Para a etapa de ICV, a maioria dos dados como a composição dos fluidos, consumo de diesel na plataforma, processos logísticos e caracterização de cascalhos, foram obtidos de fontes primárias. Dados complementares foram obtidos da base de dados Ecoinvent® versão 3.7.1. Para a composição química dos cascalhos de perfuração, foram utilizadas análises químicas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Soares et al., 2023) de 100 amostras de lixiviados, fornecidas pela indústria petrolífera parceira. Os cascalhos foram caracterizados como:

- Rocha arenítica perfurada com FPBA;
- Rocha carbonática perfurada com FPBA;
- Rocha arenítica perfurada com FPBNA;
- Rocha carbonática perfurada com FPBNA.

As concentrações das substâncias foram classificadas entre máximas, médias e mínimas, resultando em doze cenários de gestão de cascalhos de perfuração. No inventário, foram consideradas as quantidades de fluidos e combustíveis utilizados conforme dados fornecidos pela indústria petrolífera parceira.

Na fase de AICV, o software SimaPro 9.4.0.1 (PRÉ SUSTAINABILITY, 2022) foi utilizado para modelar os sistemas de produto e conduzir a AICV. O foco de análise de categoria de impacto deste estudo foi exclusivamente a ecotoxicidade marinha através do método LC-IMPACT (Verones et al., 2020). Para

ecotoxicidade marinha, a unidade de referência utilizada é a fração potencialmente desaparecida de espécies por metro cúbico por dia (PDF.m³.d), que quantifica o risco de extinção de espécies em um ecossistema devido a uma determinada atividade ou pressão.

Foram definidas as principais fontes de incerteza na caracterização de substâncias, seguido de uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto das escolhas e pressupostos iniciais nos cascalhos de perfuração. Um cenário de referência, ou *baseline*, foi estabelecido utilizando os valores médios dos compostos químicos nos cascalhos areníticos e carbonáticos, caracterizados com FPBA ou FPBNA, para servir como critério de comparação ao avaliar outros cenários ou mudanças no sistema. As concentrações mínimas e máximas e os fatores de caracterização usados para calcular a ecotoxicidade marinha permitiram a identificação de desvios em relação ao *baseline*.

Resultados e Discussão

Os impactos ambientais da categoria de ecotoxicidade marinha gerados a partir da AICV são discretizados por processos para os 12 (doze) cenários. Os dados são classificados como “mapa de calor” (Tabela 1), considerando um gradiente de cores de verde escuro a vermelho. Os valores foram categorizados da seguinte forma: verde escuro para os valores menores que 20%, verde claro para os valores entre 20% e 40%, amarelo para os valores entre 40% e 60%, laranja para os valores entre 60% e 80%, e vermelho para os maiores que 80%. Essa categorização permite uma visualização mais clara das contribuições por processos com maior potencial de impacto em ecotoxicidade marinha dos cenários analisados.

Tabela 1 – Impactos potenciais em ecotoxicidade marinha dos doze cenários do estudo (PDF.m³.d).

Cenários	Caracterização + concentrações	Fluidos de perfuração	Transporte do porto à plataforma	Operação de perfuração	Cascalho destinado ao mar (caracterização lixiviados)
1	FPBA + Arenítico	min	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
2		med	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
3		max	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
4	FPBA+Carbonático	min	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
5		med	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
6		max	1,46E+06	8,21E+04	7,41E+07
7	FPBNA+Arenítico	min	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07
8		med	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07
9		max	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07
10	FPBNA+Carbonático	min	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07
11		med	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07
12		max	2,23E+07	8,21E+04	7,41E+07

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao avaliar cada processo individualmente, os cascalhos destinados ao mar em geral são os processos que possuem maior influência em todos os cenários. O transporte de insumos do porto à plataforma é o menos impactante entre todos os processos, representando menos de 1% dos impactos totais em todos os cenários. Isso se deve ao fato de que o consumo de combustível nesse transporte não é tão significativo em comparação aos outros processos dentro da fronteira do sistema.

Os resultados de AICV revelam que as concentrações máximas de substâncias nos cascalhos causam impactos ambientais superiores ao *baseline*, enquanto as mínimas resultam em impactos menores. Os desvios padrão dos impactos ambientais variam significativamente entre diferentes combinações de cascalho e tipos de fluido de base, sendo mais estáveis com FPBA e cascalho arenítico e mais variáveis com FPBA e cascalho carbonático. Esses resultados destacam a influência crucial do tipo de cascalho e fluido de base na variabilidade dos impactos ambientais, ressaltando a necessidade de avaliação detalhada

das substâncias químicas presentes nos cascalhos para compreender melhor os impactos específicos de cada cenário.

Ao analisar quantitativamente os impactos potenciais juntamente com as substâncias associadas, observa-se que o Al é o mais impactante em 75% dos cenários. Isso sugere uma alta sensibilidade dos resultados aos níveis de alumínio presentes nos cascalhos. No entanto, observa-se que o Ba se destaca nos cenários que correspondem às concentrações mínimas dos cascalhos areníticos e carbonáticos com FPBA (cenários 1 e 4) e nos cascalhos carbonáticos com FPBA em concentrações médias (cenário 5). Essa condição se reflete através das concentrações desses elementos nos cascalhos (Tabela 3), uma vez que a concentração de Ba é 35 vezes maior do que a de Al no cenário 1, resultando na maior contribuição do Ba para os impactos. No cenário 4, a contribuição é 41 vezes maior, e 4 vezes maior no cenário 5. Porém, mesmo quando a concentração de Ba se encontra na faixa de 7% a 150% superior ao Alumínio, os impactos ainda são majoritariamente causados pelo Al.

A maior sensibilidade do Al em comparação com o Ba na categoria de ecotoxicidade marinha pode ser explicada pelos valores dos Fatores de Caracterização (FC) atribuídos a cada um desses elementos no método LC-IMPACT. Neste método, o FC do Al é significativamente maior, correspondendo a $1,52 \times 10^8$ PDF.m³.d /kg, enquanto o FC do Ba é de $5,51 \times 10^7$ PDF.m³.d/kg. Esses valores indicam que o impacto ecotoxicológico potencial do alumínio é quase três vezes maior que o do bário quando liberados no ambiente marinho.

No estudo, elementos como Pb, Zn, Ni, Mn, Cu e Cr contribuem minimamente para a ecotoxicidade marinha, representando menos de 0,1% dos impactos em comparação com elementos dominantes como Ba e Al. O Zn possui o fator de caracterização mais elevado entre eles, indicando maior potencial de efeitos tóxicos para organismos aquáticos. Seus FCs variam de 10^2 a 10^7 PDF.m³.d/kg, com destaque para o Zn, que possui o FC mais elevado entre eles ($8,08 \times 10^5$ PDF.m³.d/kg). O Fe em quantidades adequadas, pode beneficiar o crescimento de organismos, mas em excesso pode ser tóxico. Seu FC é de $5,14$ PDF.m³.d/kg, refletindo uma contribuição menor para os impactos comparado aos outros elementos inorgânicos avaliados. Quanto aos hidrocarbonetos presentes nos cascalhos de perfuração sua contribuição para a ecotoxicidade marinha é limitada devido à sua alta volatilidade, baixa solubilidade em água e tendência a se adsorver em sedimentos, reduzindo sua disponibilidade e impacto direto sobre organismos aquáticos. No entanto, a exposição crônica e a bioacumulação de HPAs ainda podem representar riscos ecológicos a longo prazo, com FCs variando entre $5,55$ PDF.m³.d/kg (hexano) e $9,05 \times 10^4$ PDF.m³.d/kg (benzo(a)pireno), refletindo sua diversidade e potenciais impactos variáveis no ambiente marinho.

Tabela 2– Substâncias responsáveis pelos impactos na categoria de ecotoxicidade marinha

Substância	Unidade	FPBA + Arenítico			FPBA + Carbonático			FPBNA + Arenítico			FPNBA + Carbonático		
		Min	Med	Max	Min	med	max	Min	med	max	Min	med	max
Alumínio	PDF.m³.d	5.52E+04	1.14E+06	2.89E+06	2.28E+04	7.07E+05	4.12E+06	1.23E+06	1.14E+06	2.89E+06	1.58E+05	1.04E+06	2.62E+06
Bário	PDF.m³.d	7.28E+05	7.94E+05	8.83E+05	3.54E+05	1.19E+06	1.66E+06	2.82E+05	7.94E+05	8.83E+05	1.38E+05	9.93E+05	1.67E+06
Substâncias restantes	PDF.m³.d	8.14E+01	3.34E+02	9.92E+02	1.01E+02	3.20E+02	8.30E+02	9.43E+01	3.34E+02	9.92E+02	1.59E+02	3.03E+02	4.76E+02

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 3 – Concentrações do Ba e Al nas caracterizações de cascalho

Substância	Unidade	FPBA + Arenítico			FPBA + Carbonático			FPBNA + Arenítico			FPNBA + Carbonático		
		Min	Med	Max	Min	Med	max	Min	med	max	min	med	max
Ba	g/t	12750.00	13906.73	15470.00	6200.00	20885.01	29000.00	4940.60	15708.52	33150.00	2410.00	17390.60	29164.00
Al	g/t	363.00	7477.35	19008.01	150.00	4649.34	27100.00	8068.00	20788.00	32400.00	1040.00	6866.42	17218.00

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conclusões

Este estudo destaca a importância crucial de avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da perfuração *offshore*, especialmente no descarte de cascalhos no mar, dada a relevância estratégica do setor petrolífero para o Brasil e os potenciais danos ambientais associados. A ACV permitiu quantificar esses impactos potenciais desde a extração dos fluidos de perfuração até o descarte final dos cascalhos. Os cascalhos emergiram como os principais contribuintes para os impactos ambientais potenciais quantificados na categoria de ecotoxicidade marinha, com os descartes no mar mostrando-se particularmente significativos. Entre os fluidos de perfuração, o FPBNA foi identificado como mais impactante que o FPBA. A variabilidade nas concentrações influenciou diretamente os impactos, sendo que concentrações máximas resultaram em impactos potenciais muito maiores que o *baseline*, enquanto concentrações mínimas geraram impactos menores, destacando a sensibilidade dos resultados às variações extremas. Na análise de sensibilidade de elementos e substâncias, os níveis de Alumínio nos cascalhos destacam-se em 75% dos cenários avaliados, com o Bário como segundo maior contribuinte. Outros metais como Pb, Zn, Ni, Mn, Cu e Cr, assim como hidrocarbonetos individuais do petróleo, contribuíram com menos de 0,1% para os impactos de ecotoxicidade marinha. A variabilidade nos impactos entre os cenários enfatiza a necessidade de gerenciar cuidadosamente as concentrações de substâncias tóxicas, especialmente Alumínio, para mitigar os impactos ambientais associados à perfuração de petróleo.

Agradecimentos

Agradecemos à indústria petrolífera parceira pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico, garantidos por meio da viabilização dos recursos necessários para desenvolvimento e execução do presente projeto.

Referências Bibliográficas

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b. 46 p.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G. Drilling fluids: State of the art. Journal of Petroleum Science and Engineering, n. 14, p. 221–230, 1996.

DE ALMEIDA, P. C. Análise técnico-ambiental de alternativas de processamento de cascalho de perfuração offshore. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 173. 2016.

FAGUNDES, T. B. Caracterização de cascalhos de perfuração de poços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais. Mestrado em Engenharia Mineral—São Paulo: Universidade de São Paulo, 26 jul. 2018.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Instrução Normativa nº 01, de 02 de janeiro de 2018. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 43, 05 fev. 2018a.

IOGP – International Association of Oil & Gas Producers. Report 557 – Drilling waste management technology review. 2016b.

EC-JRC, E. COMMISSION. J. R. CENTRE. I. F. E. A. S. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance. LU: Publications Office, 2010.

MMA, M. DO M. Brasil: 5o relatório nacional para a convenção sobre diversidade biológica. [s.l.] MMA, 2016.

PRÉ SUSTAINABILITY. SimaPro. v. 9.4.0.1, 2022.

ROSENBAUM, R. K.; GEORGIADIS, S.; FANTKE, P. Uncertainty Management and Sensitivity Analysis. Em: HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. (Eds.). Life Cycle Assessment. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 271–321.

SOARES, A. S. F.; MARQUES, M. R. C.; COSTA, L. C. Physicalchemical characterization and leaching studies involving drill cuttings generated in oil and gas presalt drilling activities. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, p. 17899914, 2023.

VASCONCELOS, A. N. et al. Dimer fatty acid and fatty amide effects on the properties of synthetic-based drilling fluids. Journal of Molecular Liquids, v. 359, p. 119270, 1 ago. 2022.

VERONES, F.; HELLWEG, S.; ANTÓN, A.; AZEVEDO, L. B.; CHAUDHARY, A.; COSME, N. et al. LC-IMPACT: A regionalized life cycle damage assessment method. Journal of Industrial Ecology, v. 24, n. 6, p. 12011219, 31 mai. 2020.