



Tecnologias de Resposta a Derramamentos de Petróleo em Ambientes Marinhos: Uma Abordagem Baseada em Critérios de Aplicação e Materiais Sorventes de Base Biológica

Marine Oil Spill Response Technologies: An Approach Based on Application Criteria and Bio-Based Sorbent Materials

Célia Karina Maia Cardoso

Doutorado em Engenharia Química, Professora Colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/6172968855313172>

Rebeca da Paixão Gomes Cardoso

Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/9488882480060104>

Ícaro Thiago Andrade Moreira

Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeoquímica e Recursos Hídricos, Professor do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal da Bahia, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/9106175138631030>

Resumo: O petróleo desempenha papel estratégico na matriz energética mundial, porém sua exploração, produção, transporte e armazenamento estão associados ao risco de derramamentos capazes de provocar impactos ambientais, sociais e econômicos significativos, especialmente em ecossistemas marinhos e costeiros. A resposta a esses eventos requer a seleção de estratégias que conciliem eficiência na contenção, recuperação e remediação do contaminante com a minimização dos impactos decorrentes das operações de limpeza. Este capítulo apresenta uma revisão das principais tecnologias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes marinhos, abordando os critérios técnicos e ambientais que orientam a seleção das estratégias mais adequadas para diferentes cenários de contaminação. São discutidos os fundamentos, aplicações, vantagens e limitações dos métodos físicos e mecânicos, químicos e biológicos, com ênfase nos materiais sorventes de base biológica, que vêm se destacando como uma alternativa promissora devido à elevada eficiência de sorção, ao menor impacto ambiental e ao potencial de valorização de resíduos renováveis. Ao final, são discutidos os desafios e as perspectivas para o aprimoramento das tecnologias de resposta, ressaltando a importância de abordagens integradas e da seleção criteriosa das estratégias para aumentar a eficiência das operações e promover uma gestão mais sustentável dos derramamentos de petróleo.

Palavras-chave: derramamento de petróleo; tecnologias de resposta; materiais sorventes de base biológica; remediação ambiental.

Abstract: Oil plays a strategic role in the global energy matrix; however, its exploration, production, transportation, and storage are associated with the risk of spills that can cause significant environmental, social, and economic impacts, particularly in marine and coastal ecosystems. Effective response to these events requires the selection of strategies that combine efficient containment, recovery, and remediation with the minimization of secondary environmental impacts resulting from cleanup operations. This chapter reviews

the main technologies employed in marine oil spill response, addressing the technical and environmental criteria that guide the selection of the most appropriate response strategies for different spill scenarios. The principles, applications, advantages, and limitations of physical and mechanical, chemical, and biological methods are discussed, with emphasis on bio-based sorbent materials, which have emerged as a promising alternative due to their high sorption efficiency, reduced environmental impact, and potential for the valorization of renewable residues. Finally, current challenges and future perspectives are presented, highlighting the importance of integrated approaches and criteria-based decision-making to improve response effectiveness and promote more sustainable management of marine oil spills.

Keywords: oil spill; response technologies; bio-based sorbent materials; environmental remediation.

INTRODUÇÃO

O petróleo desempenha papel estratégico na matriz energética mundial e constitui uma das principais matérias-primas para a produção de combustíveis, lubrificantes, polímeros, fertilizantes e diversos outros produtos essenciais à sociedade. Entretanto, as atividades relacionadas à sua exploração, produção, transporte, distribuição e armazenamento estão associadas ao risco de derramamentos que podem ocasionar impactos ambientais significativos, comprometendo a fauna, a flora e o equilíbrio de ecossistemas marinhos e costeiros, como praias, recifes de coral, costões rochosos e manguezais (Annunciado *et al.*, 2005; Cardoso *et al.*, 2025; EPA, 1999; IPIECA, 1994; ITOPF, 2015).

Nas últimas décadas, a frequência e o volume dos grandes derramamentos de petróleo foram reduzidos em decorrência do aperfeiçoamento das operações industriais, da evolução das tecnologias de monitoramento, da implementação de regulamentações mais rigorosas e do fortalecimento dos planos de contingência para resposta a emergências. Apesar desses avanços, acidentes continuam ocorrendo em diferentes regiões do mundo, representando uma importante fonte de contaminação ambiental e evidenciando a necessidade do desenvolvimento contínuo de estratégias capazes de minimizar seus impactos e acelerar a recuperação dos ecossistemas afetados (ITOPF, 2024; Lopes *et al.*, 2007).

A resposta a derramamentos de petróleo envolve um conjunto de ações destinadas à contenção, recuperação, remoção e remediação do contaminante, cuja eficiência depende da seleção adequada das tecnologias empregadas. A escolha da estratégia de resposta deve considerar diversos fatores, incluindo as características físico-químicas do petróleo, o grau de intemperismo, a magnitude do derramamento, as condições meteorológicas e oceanográficas, a sensibilidade ecológica da área afetada, a disponibilidade de recursos operacionais e os potenciais impactos decorrentes da própria intervenção. Dessa forma, a adoção de técnicas inadequadas pode comprometer a eficiência das operações e intensificar os danos ambientais (Cantagallo *et al.*, 2007; Cardoso *et al.*, 2025; IPIECA, 1994).

Atualmente, diferentes tecnologias são empregadas na resposta a derramamentos de petróleo, podendo ser agrupadas em métodos físicos e

mecânicos, químicos e biológicos. Entre elas destacam-se a remoção manual, as barreiras de contenção e skimmers, a remoção mecânica, o hidrojateamento, os materiais sorventes, os dispersantes químicos, a queima in situ, a biorremediação e os processos naturais de atenuação. Embora essas tecnologias apresentem aplicações complementares, os materiais sorventes, especialmente aqueles produzidos a partir de recursos renováveis e resíduos de base biológica, vêm recebendo crescente atenção em virtude de sua elevada eficiência na recuperação do petróleo, menor impacto ambiental e potencial de valorização de resíduos, em consonância com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável (Annunciado *et al.*, 2005; Cardoso *et al.*, 2025).

Diante da diversidade de tecnologias disponíveis e da complexidade dos ambientes costeiros e marinhos, torna-se fundamental compreender os princípios de funcionamento, as vantagens, as limitações e, principalmente, os critérios técnicos e ambientais que orientam a seleção da estratégia mais adequada para cada cenário de derramamento. Esse conhecimento subsidia a tomada de decisão durante situações de emergência, contribui para a elaboração de planos de contingência mais eficientes e favorece o desenvolvimento e a aplicação de materiais mais sustentáveis para a remediação ambiental.

Nesse contexto, este capítulo tem como objetivo revisar as principais tecnologias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes marinhos, discutindo os critérios que orientam sua aplicação em diferentes cenários e apresentando uma análise das potencialidades dos materiais sorventes de base biológica como alternativa sustentável para a recuperação do petróleo e mitigação dos impactos ambientais.

PETRÓLEO: COMPOSIÇÃO QUÍMICA, CLASSIFICAÇÕES E APLICAÇÕES

O petróleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos de origem fóssil, constituída predominantemente por hidrocarbonetos e pequenas quantidades de compostos contendo enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais traço. Apresenta aspecto oleoso, odor característico, elevada inflamabilidade e, em geral, densidade inferior à da água. É encontrado em reservatórios localizados em rochas sedimentares, podendo ocorrer nas fases líquida (óleo cru) e gasosa (gás natural) (Peters *et al.*, 2005; Petrobras, 1984).

Sua composição química é formada principalmente por hidrocarbonetos saturados e aromáticos, além de compostos heteroatômicos conhecidos como NSO (*Nitrogen, Sulfur and Oxygen*), representados principalmente por resinas e asfaltenos. Também podem estar presentes elementos-traço, como vanádio, níquel, sódio, cálcio, cobre e urânio. A proporção entre essas frações determina importantes propriedades físico-químicas do petróleo, influenciando seu comportamento durante processos de produção, refino, transporte e, principalmente, após derramamentos em ambientes naturais (Lanzillotta, 2008; Oliveira, 2004; Wang *et al.*, 2013).

Os hidrocarbonetos saturados, também denominados alcanos ou parafinas, apresentam apenas ligações simples entre os átomos de carbono. Já os hidrocarbonetos aromáticos possuem estruturas cíclicas baseadas em anéis benzênicos, contendo ligações simples e duplas alternadas. A associação de dois ou mais anéis aromáticos origina os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), compostos caracterizados por elevada estabilidade química, baixa solubilidade em água e elevada persistência ambiental (Lanzillotta, 2008; Petrobras, 1984).

Os HPAs podem ser classificados de acordo com sua origem em compostos petrogênicos e pirolíticos. Os HPAs petrogênicos estão associados ao petróleo e seus derivados, sendo liberados principalmente durante processos de exploração, refino, transporte e derramamentos. Em geral, apresentam dois ou três anéis aromáticos e maior grau de alquilação. Por outro lado, os HPAs pirolíticos são formados durante a combustão incompleta de matéria orgânica, como carvão, derivados de petróleo, biomassa e combustíveis fósseis, sendo caracterizados por maior número de anéis aromáticos e menor grau de alquilação (Lanzillotta, 2008).

Devido à sua persistência e ao potencial de bioacumulação, os HPAs constituem um dos grupos de contaminantes orgânicos de maior interesse ambiental. Diversos compostos dessa classe apresentam propriedades mutagênicas, carcinogênicas e teratogênicas, razão pela qual são frequentemente empregados como indicadores em programas de monitoramento ambiental e de avaliação de riscos à saúde humana (Lanzillotta, 2008; Reyes *et al.*, 2014).

Os diferentes tipos de petróleo podem ser classificados de acordo com sua densidade relativa, expressa em graus API (*American Petroleum Institute*). De maneira geral, óleos com maior grau API são considerados leves, enquanto aqueles com menores valores são classificados como médios ou pesados, refletindo diferenças em sua composição química e propriedades físico-químicas. Embora existam pequenas variações entre os critérios adotados por diferentes instituições, é comum classificar os petróleos como leves (API superior a 30°), médios (entre 22° e 30°) e pesados (inferior a 22°) (Barragan, 2012; Sousa Junior, 2009).

O Brasil possui importantes bacias sedimentares produtoras de petróleo distribuídas em diferentes regiões do território nacional. Historicamente, destacam-se as bacias do Recôncavo e do Solimões, tradicionalmente associadas à produção de óleos leves, além das bacias Potiguar e Sergipe-Alagoas, com predominância de petróleos médios. A Bacia de Campos, uma das principais produtoras do país, apresenta predominância de óleos classificados entre médios e pesados (Barragan, 2012; Petrobras, 2015).

Nas últimas décadas, entretanto, a produção nacional passou a ser fortemente impulsionada pelas reservas do pré-sal, localizadas principalmente nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo. Essas jazidas, situadas em águas profundas e ultraprofundas abaixo de uma extensa camada de sal, figuram entre as maiores descobertas petrolíferas das últimas décadas e consolidaram o Brasil entre os principais produtores mundiais de petróleo. O petróleo proveniente dessas reservas apresenta, em geral, elevada qualidade, caracterizando-se por graus API médios

a elevados e baixo teor de enxofre, o que aumenta seu valor comercial e reduz os custos de refino (ANP, 2024).

Paralelamente, novas fronteiras exploratórias vêm sendo incorporadas ao planejamento energético nacional, com destaque para a Margem Equatorial Brasileira, que se estende do estado do Amapá ao Rio Grande do Norte, abrangendo aproximadamente 2.200 km de litoral e incluindo importantes bacias sedimentares, como Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar. Essa região é considerada uma das principais fronteiras exploratórias do país, apresentando elevado potencial para a descoberta e produção de petróleo e gás natural, segundo avaliações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2024; Chang *et al.*, 2008).

Além de sua relevância como principal fonte mundial de energia, o petróleo constitui uma matéria-prima estratégica para diversos segmentos industriais. Seus derivados são empregados na produção de combustíveis, como gasolina, diesel e gás liquefeito de petróleo (GLP), bem como na fabricação de lubrificantes, asfaltos, parafinas, solventes, fertilizantes, medicamentos, fibras sintéticas, polímeros e inúmeros produtos da indústria petroquímica, evidenciando sua importância econômica e tecnológica em escala global (Machado, 2013).

DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO EM ÁREAS COSTEIRAS

As atividades de exploração, produção, transporte, refino e armazenamento de petróleo, tanto em ambientes terrestres (*onshore*) quanto marinhos (*offshore*), estão entre as principais fontes potenciais de derramamentos de óleo. Esses acidentes podem resultar de falhas operacionais, rompimento de oleodutos, acidentes com embarcações, vazamentos em plataformas e terminais petrolíferos, além de descartes inadequados de resíduos oleosos (Cantagallo *et al.*, 2007; ITOPE, 2015; ITOPE, 2024).

Nas últimas décadas, observa-se uma redução significativa no número e no volume dos grandes derramamentos em escala mundial, atribuída ao fortalecimento das regulamentações ambientais, aos avanços tecnológicos e ao aperfeiçoamento dos planos de prevenção e resposta. Apesar disso, acidentes continuam ocorrendo e representam importante fonte de contaminação ambiental, principalmente em regiões costeiras de elevada sensibilidade ecológica, reforçando a necessidade de tecnologias cada vez mais eficientes para contenção, recuperação e remediação do petróleo (Caldas, 2011; Cantagallo *et al.*, 2007; IFELEBUEGU *et al.*, 2015; ITOPE, 2024; Cardoso *et al.*, 2025).

Após sua liberação no ambiente, o petróleo sofre uma série de transformações físicas, químicas e biológicas, conhecidas como processos de intemperismo (*weathering*), que incluem espalhamento, evaporação, dissolução, dispersão natural, emulsificação, oxidação, sedimentação e biodegradação. Esses processos alteram continuamente as propriedades físico-químicas do óleo e influenciam diretamente sua persistência no ambiente e a eficiência das estratégias de resposta

(ITOPF, 2015; Reyes *et al.*, 2014). A intensidade dessas transformações depende da composição do petróleo, das condições meteorológicas e oceanográficas e da atividade microbiológica, sendo as frações mais leves rapidamente removidas por evaporação, enquanto resinas, asfaltenos e compostos aromáticos de elevada massa molecular tendem a permanecer por períodos mais prolongados (Jagaba *et al.*, 2022; Reyes *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2022).

Os derramamentos de petróleo provocam impactos ambientais, sociais e econômicos que podem persistir por anos ou décadas. A presença de óleo na superfície da água compromete as trocas gasosas e a penetração de luz, afetando a produtividade primária, enquanto compostos tóxicos presentes no petróleo podem causar bioacumulação, biomagnificação e efeitos adversos sobre diferentes níveis tróficos, comprometendo a biodiversidade e o funcionamento dos ecossistemas costeiros (Jagaba *et al.*, 2022; Venkatraman *et al.*, 2024). Além dos impactos ecológicos, esses acidentes afetam atividades como pesca, aquicultura e turismo, gerando elevados custos associados às operações de limpeza e recuperação ambiental (ITOPF, 2015; Moreira, 2014).

Acidentes como o Exxon Valdez (1989), o Deepwater Horizon (2010) e, no Brasil, o derramamento que atingiu cerca de 4.000 km do litoral em 2019 evidenciam a magnitude dos impactos e a necessidade de estratégias de resposta rápidas e eficientes (Aragão *et al.*, 2025; IBAMA, 2020; Oliveira *et al.*, 2020). A vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros brasileiros, associada à intensa atividade petrolífera e ao elevado tráfego marítimo, reforça a importância da seleção criteriosa das tecnologias de contenção, recuperação e remediação, considerando as características do petróleo, o grau de intemperismo, as condições ambientais e a sensibilidade dos ecossistemas afetados (CETESB, 2015; Moreira, 2014).

CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE RESPOSTA

A resposta a um derramamento de petróleo tem como principal objetivo minimizar os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da contaminação de ecossistemas marinhos e costeiros. Para isso, diversas tecnologias de contenção, recuperação e remediação foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Entretanto, não existe uma técnica universalmente aplicável, sendo necessária a seleção da estratégia mais adequada para cada cenário de derramamento. Uma escolha inadequada pode intensificar os danos ambientais, retardar a recuperação do ecossistema e aumentar os custos das operações de resposta (Cantagallo *et al.*, 2007).

Embora exista a tendência de priorizar métodos capazes de remover rapidamente o petróleo visível na superfície, a eficiência operacional nem sempre corresponde ao menor impacto ambiental. Em determinadas situações, técnicas consideradas rápidas podem causar perturbações físicas e biológicas superiores às provocadas pelo próprio derramamento, prolongando o tempo necessário para a recuperação natural do ambiente. Dessa forma, as ações de resposta devem

buscar não apenas a máxima eficiência na remoção do contaminante, mas também a minimização dos impactos secundários decorrentes das operações de limpeza (API, 2015; ITOPE, 2015; Lopes *et al.*, 2007).

A seleção da tecnologia de remediação depende, inicialmente, do conhecimento das propriedades físico-químicas do petróleo derramado. Características como densidade relativa ($^{\circ}$ API), viscosidade, tenacidade, ponto de fulgor, solubilidade, tensão superficial e grau de intemperismo influenciam diretamente o comportamento do óleo no ambiente e, conseqüentemente, a eficiência das diferentes técnicas de resposta. Além disso, análises químicas, incluindo a determinação da concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), contribuem para a avaliação dos riscos ambientais e ocupacionais envolvidos nas operações de limpeza (Lopes *et al.*, 2007).

As características do ambiente impactado também exercem papel decisivo na definição da estratégia de resposta. Aspectos como sensibilidade ecológica, tipo de ecossistema, hidrodinamismo, regime de marés, granulometria do sedimento, acessibilidade da área e presença de comunidades humanas devem ser considerados durante o planejamento das operações. Historicamente, áreas de maior visibilidade pública, como praias urbanas e turísticas, tendem a receber prioridade nas ações de limpeza, enquanto ambientes ecologicamente mais sensíveis, como manguezais, marismas e recifes de coral, frequentemente demandam estratégias específicas devido à elevada vulnerabilidade de suas comunidades biológicas (Cantagallo *et al.*, 2007; Lopes *et al.*, 2007).

Outro aspecto fundamental corresponde à análise da relação custo-benefício das tecnologias empregadas. Todas as estratégias de resposta apresentam limitações e podem provocar impactos ambientais adicionais em diferentes níveis. Assim, a escolha da técnica deve buscar o equilíbrio entre eficiência operacional, viabilidade econômica, segurança das equipes envolvidas e preservação ambiental, priorizando métodos que reduzam os danos ecológicos sem comprometer a eficácia da remoção do petróleo (Lopes *et al.*, 2007).

TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO APLICÁVEIS EM ÁREAS COSTEIRAS IMPACTADAS

Atualmente, as principais tecnologias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo podem ser agrupadas em métodos físicos e mecânicos, métodos químicos e métodos biológicos. Entre elas destacam-se a remoção manual, barreiras de contenção e skimmers, remoção mecânica, hidrojateamento, dispersantes químicos, queima in situ, biorremediação e materiais sorventes, cuja aplicação depende das características do petróleo, das condições ambientais e dos objetivos da operação de resposta (Ferrão, 2005; Lopes *et al.*, 2007; Cardoso *et al.*, 2025).

Métodos Físicos e Mecânicos

Os métodos físicos e mecânicos constituem a primeira linha de resposta aos derramamentos de petróleo e têm como principal objetivo conter, recuperar e remover o óleo antes que ele se espalhe ou atinja áreas ecologicamente sensíveis. Diferentemente das técnicas químicas e biológicas, esses métodos promovem a retirada física do contaminante do ambiente, reduzindo sua disponibilidade para os processos de intemperismo. Sua eficiência depende das propriedades do petróleo, das condições meteorológicas e oceanográficas, da espessura da mancha, da acessibilidade da área afetada e da rapidez da resposta ao incidente (ITOPF, 2024; Lopes *et al.*, 2007).

Entre os principais métodos físicos e mecânicos destacam-se a remoção manual, as barreiras de contenção (booms), os recolhedores mecânicos (skimmers), a remoção mecânica, o hidrojateamento e os materiais sorventes. Na prática, essas técnicas são frequentemente utilizadas de forma integrada para aumentar a eficiência da recuperação do petróleo e minimizar os impactos ambientais (CETESB, 2015; ITOPF, 2024).

A remoção manual é recomendada para áreas de difícil acesso ou elevada sensibilidade ambiental, como costões rochosos e manguezais, onde o uso de equipamentos pesados pode causar impactos adicionais. Embora apresente baixa produtividade e elevada demanda de mão de obra, essa técnica reduz as perturbações ao ambiente quando comparada aos métodos mecanizados (CETESB, 2015; Ferrão, 2005; Lopes *et al.*, 2007).

As barreiras de contenção são empregadas nas etapas iniciais da resposta para limitar o deslocamento da mancha de óleo, proteger áreas sensíveis e concentrar o contaminante em regiões favoráveis à recuperação. Associados a elas, os skimmers promovem o recolhimento mecânico do petróleo por diferentes sistemas, sendo sua eficiência influenciada pelas condições do mar, pela espessura da mancha e pelas propriedades do óleo (ITOPF, 2024; Lopes *et al.*, 2007).

Em derramamentos que atingem praias, equipamentos pesados podem ser empregados para remover sedimentos contaminados, embora sua utilização deva ser criteriosa devido aos possíveis impactos sobre a morfologia da praia e os habitats bentônicos. O hidrojateamento, por sua vez, é amplamente utilizado na limpeza de costões rochosos e estruturas consolidadas, apresentando elevada eficiência na remoção de óleos aderidos, mas podendo causar impactos sobre organismos incrustantes (CETESB, 2015; ITOPF, 2024; Lopes *et al.*, 2007).

Os materiais sorventes constituem outra importante alternativa física para recuperação do petróleo, sendo empregados desde pequenas operações de limpeza até ações de maior escala (Cardoso *et al.*, 2025). Em função de sua relevância e do crescente desenvolvimento de materiais sorventes de base biológica, essa tecnologia será discutida em maior detalhamento na seção seguinte.

Métodos Químicos

Os métodos químicos têm como objetivo modificar as propriedades físico-químicas do petróleo derramado, reduzindo sua permanência na superfície da água e favorecendo sua dispersão ou degradação natural. Diferentemente dos métodos físicos e mecânicos, essas tecnologias não promovem necessariamente a remoção do óleo, sendo sua aplicação dependente das características do petróleo, do estágio de intemperismo, das condições oceanográficas e da sensibilidade ambiental da área afetada (ITOPF, 2024).

As principais técnicas químicas empregadas na resposta a derramamentos são os dispersantes químicos e a queima *in situ*, cuja utilização deve ser precedida de avaliação técnica e ambiental, considerando seus benefícios e limitações.

Os dispersantes são formulações à base de tensoativos e solventes que reduzem a tensão interfacial entre o petróleo e a água, promovendo a formação de pequenas gotículas dispersas na coluna d'água e favorecendo sua biodegradação. Sua aplicação é mais eficiente nas primeiras horas após o derramamento e é indicada principalmente para derramamentos em mar aberto, onde a maior profundidade e circulação da água reduzem os riscos associados ao aumento temporário da concentração de hidrocarbonetos. No Brasil, seu uso é regulamentado pelo CONAMA e restrito a produtos previamente aprovados pelos órgãos competentes (CONAMA, 2001; ITOPF, 2024).

Apesar de reduzirem a probabilidade de o petróleo atingir a linha de costa, os dispersantes aumentam a exposição de organismos aquáticos aos hidrocarbonetos dispersos, exigindo que sua aplicação seja baseada em uma análise integrada entre os benefícios da proteção dos ecossistemas costeiros e os possíveis impactos sobre o ambiente marinho (ITOPF, 2024).

A queima *in situ* consiste na combustão controlada do petróleo sobre a superfície da água, permitindo rápida redução do volume de óleo quando aplicada a manchas espessas de petróleo fresco, geralmente confinadas por barreiras resistentes ao calor. Entretanto, a técnica apresenta limitações relacionadas à emissão de fumaça e material particulado, à geração de resíduos parcialmente queimados e aos riscos operacionais, sendo empregada apenas em situações específicas e após criteriosa avaliação técnica e ambiental (Craig *et al.*, 2012; ITOPF, 2024; NOAA, 2001).

Métodos Biológicos

Os métodos químicos têm como objetivo modificar as propriedades físico-químicas do petróleo derramado, reduzindo sua permanência na superfície da água e favorecendo sua dispersão ou degradação natural. Diferentemente dos métodos físicos e mecânicos, essas tecnologias não promovem necessariamente a remoção do óleo, sendo sua aplicação dependente das características do petróleo, do estágio de intemperismo, das condições oceanográficas e da sensibilidade ambiental da área afetada (ITOPF, 2024; NOAA, 2015).

As principais técnicas químicas empregadas na resposta a derramamentos são os dispersantes químicos e a queima *in situ*, cuja utilização deve ser precedida de avaliação técnica e ambiental, considerando seus benefícios e limitações. Os dispersantes são formulações à base de tensoativos e solventes que reduzem a tensão interfacial entre o petróleo e a água, promovendo a formação de pequenas gotículas dispersas na coluna d'água e favorecendo sua biodegradação. Sua aplicação é mais eficiente nas primeiras horas após o derramamento e é indicada principalmente para derramamentos em mar aberto, onde a maior profundidade e circulação da água reduzem os riscos associados ao aumento temporário da concentração de hidrocarbonetos. No Brasil, seu uso é regulamentado pelo CONAMA e restrito a produtos previamente aprovados pelos órgãos competentes (CONAMA, 2001; ITOPF, 2024).

Apesar de reduzirem a probabilidade de o petróleo atingir a linha de costa, os dispersantes aumentam a exposição de organismos aquáticos aos hidrocarbonetos dispersos, exigindo que sua aplicação seja baseada em uma análise integrada entre os benefícios da proteção dos ecossistemas costeiros e os possíveis impactos sobre o ambiente marinho (ITOPF, 2024; NOAA, 2015).

A queima *in situ* consiste na combustão controlada do petróleo sobre a superfície da água, permitindo rápida redução do volume de óleo quando aplicada a manchas espessas de petróleo fresco, geralmente confinadas por barreiras resistentes ao calor. Entretanto, a técnica apresenta limitações relacionadas à emissão de fumaça e material particulado, à geração de resíduos parcialmente queimados e aos riscos operacionais, sendo empregada apenas em situações específicas e após criteriosa avaliação técnica e ambiental (Craig *et al.*, 2012; ITOPF, 2024; NOAA, 2015).

MATERIAIS SORVENTES DE BASE BIOLÓGICA

Os materiais sorventes constituem uma das tecnologias mais tradicionais empregadas na resposta a derramamentos de petróleo, sendo utilizados principalmente na recuperação de pequenas manchas, no polimento das operações de limpeza e na proteção de áreas ambientalmente sensíveis. Entre os sorventes disponíveis destacam-se os materiais sintéticos, minerais e naturais, sendo estes últimos compostos predominantemente por matérias-primas vegetais, como fibras de coco, sisal, paina, bagaço de cana-de-açúcar, serragem e outros resíduos lignocelulósicos. Sorventes inorgânicos também podem ser obtidos a partir de minerais, como argilas, sílica, vermiculita e calcário, submetidos a diferentes processos industriais (Annunciado *et al.*, 2005; Cardoso *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2022).

A eficiência desses materiais depende de propriedades como hidrofobicidade, oleofilicidade, capacidade de sorção e flutuabilidade. Materiais com elevada afinidade pela água tendem a aumentar sua densidade durante a operação, podendo afundar e dificultar a recuperação do petróleo, além de favorecer o transporte do contaminante para o sedimento. Além das características do sorvente, fatores

como o tipo de petróleo, seu grau de intemperismo, a viscosidade e as condições meteorológicas e oceanográficas influenciam diretamente o desempenho da sorção (EPA, 1999; Lopes *et al.*, 2007; Cardoso *et al.*, 2025).

Os materiais sorventes naturais despertam crescente interesse devido à sua origem renovável, ampla disponibilidade, baixo custo e biodegradabilidade. De modo geral, apresentam capacidade de sorção equivalente a diversas vezes sua própria massa, podendo ser empregados em diferentes ambientes costeiros e marinhos. Entretanto, a utilização desses materiais na forma de partículas dispersas dificulta sua recuperação após a operação de limpeza e pode ocasionar impactos secundários ao ambiente. Para minimizar esse problema, é comum sua incorporação em mantas, almofadas, barreiras ou outros sistemas porosos que facilitam o recolhimento e aumentam a eficiência operacional (Cardoso *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, resíduos agroindustriais lignocelulósicos têm recebido destaque como alternativa sustentável aos sorventes convencionais. Fibras provenientes de coco, açaí, paina, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e outros resíduos agrícolas apresentam elevada porosidade, baixa densidade e boa capacidade de retenção de hidrocarbonetos, além de contribuírem para a valorização de resíduos e para os princípios da economia circular. Diferentes estratégias de modificação física, química e biológica vêm sendo empregadas para aumentar a hidrofobicidade e a capacidade de sorção desses materiais, ampliando seu potencial de aplicação em operações de resposta a derramamentos de petróleo (Annunciado *et al.*, 2005; Cardoso *et al.*, 2025; Lopes *et al.*, 2007).

Após a utilização, os materiais sorventes devem ser adequadamente recolhidos para evitar a contaminação secundária do ambiente. Dependendo de suas características e do grau de contaminação, podem ser destinados à reciclagem, regeneração, recuperação energética ou descarte ambientalmente adequado, reforçando sua importância como alternativa eficiente e sustentável para a mitigação dos impactos causados por derramamentos de petróleo (ITOPF, 2011).

A seleção do material sorvente mais adequado deve considerar não apenas sua capacidade de retenção de petróleo, mas também fatores como fluviabilidade, facilidade de recuperação, possibilidade de reutilização, disponibilidade, custo e destino final após o uso. Dessa forma, a escolha do sorvente deve integrar critérios técnicos, ambientais e operacionais, contribuindo para aumentar a eficiência das operações de limpeza e minimizar os impactos decorrentes dos derramamentos de petróleo.

COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS

A escolha da estratégia de resposta a derramamentos de petróleo depende das características do óleo, das condições ambientais, da sensibilidade do ecossistema afetado e da disponibilidade de recursos operacionais. Dessa forma, não existe uma tecnologia universalmente aplicável, sendo comum a utilização de abordagens

integradas que combinem métodos físicos e mecânicos, químicos e biológicos para maximizar a eficiência da remediação e minimizar os impactos ambientais (ITOPF, 2024; NOAA, 2013).

De modo geral, os métodos físicos e mecânicos apresentam maior eficiência na contenção e recuperação inicial do óleo, enquanto as técnicas químicas são indicadas para situações específicas, principalmente em mar aberto. Já os métodos biológicos atuam como estratégias complementares, favorecendo a degradação dos hidrocarbonetos remanescentes. Nesse contexto, os materiais sorventes ocupam posição de destaque entre as tecnologias físicas, por possibilitarem a recuperação direta do petróleo derramado e apresentarem elevada versatilidade operacional. Entre os diferentes tipos de sorventes, os materiais de base biológica têm recebido crescente atenção devido à sua elevada capacidade de sorção, baixo custo, biodegradabilidade, ampla disponibilidade e potencial de valorização de resíduos lignocelulósicos, tornando-se uma alternativa promissora para operações de resposta ambiental mais sustentáveis. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais tecnologias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes marinhos.

Tabela 1 – Comparação de algumas tecnologias empregadas na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes marinhos.

Tecnologia	Princípio	Principais aplicações	Vantagens	Limitações
Barreiras de contenção e skimmers	Contenção e recuperação do óleo superficial	Primeira resposta em mar aberto e áreas costeiras	Recuperação do petróleo e proteção de áreas sensíveis	Eficiência reduzida em condições adversas de mar
Remoção mecânica	Retirada de sedimentos ou materiais contaminados	Praias e grandes áreas contaminadas	Alta produtividade	Pode causar alterações físicas ao ambiente
Dispersantes químicos	Dispersão do óleo na coluna d'água	Derramamentos em mar aberto	Reduz a chegada do óleo à costa	Potenciais impactos sobre organismos aquáticos
Queima in situ	Combustão controlada do petróleo	Grandes derramamentos com óleo fresco	Rápida redução do volume de óleo	Emissões atmosféricas e resíduos da combustão
Biorremediação	Degradação microbiana dos hidrocarbonetos	Tratamento de resíduos e contaminações residuais	Ambientalmente sustentável	Processo lento e dependente das condições ambientais

Materiais sorventes	Retenção do petróleo por adsorção e/ou absorção	Pequenos e médios derramamentos, polimento da limpeza e proteção de áreas sensíveis	Recuperação direta do petróleo, fácil aplicação, baixo impacto ambiental e possibilidade de utilização de materiais de base biológica	Eficiência dependente do tipo de óleo, saturação do material e necessidade de recolhimento e destinação adequada
---------------------	---	---	---	--

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Apesar dos avanços alcançados, desafios relacionados à exploração em águas profundas e ultraprofundas, às novas fronteiras exploratórias, como a Margem Equatorial Brasileira, e à necessidade de reduzir os impactos das próprias operações de limpeza impulsionam o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Nesse cenário, os materiais sorventes de base biológica vêm se consolidando como uma das principais linhas de pesquisa, impulsionados pelo desenvolvimento de novos materiais, por modificações físicas, químicas e biológicas capazes de aumentar sua eficiência e pela crescente demanda por soluções alinhadas aos princípios da economia circular. Assim, a integração entre diferentes métodos de resposta, associada ao uso de ferramentas de monitoramento, modelagem e apoio à decisão, representa a principal tendência para o aprimoramento da gestão de derramamentos de petróleo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os derramamentos de petróleo continuam representando um importante desafio ambiental, exigindo estratégias de resposta que conciliem eficiência operacional e proteção dos ecossistemas. Como discutido, não existe uma tecnologia universalmente aplicável, sendo a seleção da técnica dependente das características do petróleo, do grau de intemperismo, das condições ambientais e da sensibilidade da área afetada. Nesse contexto, a integração entre métodos físicos, químicos e biológicos constitui a abordagem mais adequada, destacando-se os materiais sorventes de base biológica como uma alternativa promissora devido à elevada capacidade de sorção, biodegradabilidade, baixo custo e potencial de valorização de resíduos lignocelulósicos. Dessa forma, o desenvolvimento de biosorventes e de estratégias de resposta mais sustentáveis tende a desempenhar papel cada vez mais relevante na mitigação dos impactos de derramamentos de petróleo em ambientes marinhos e costeiros.

REFERÊNCIAS

- ANNUNCIADO, T. R.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. **Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills**. Marine Pollution Bulletin, v. 50, n. 11, p. 1340–1346, 2005.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – Margem Equatorial**. Rio de Janeiro: ANP, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp>. Acesso em: 23 jul. 2026.
- ARAGÃO, L. H. A. *et al.* **Instruments for assessing the impacts of oil spills: an integrated approach to health, the environment and the socioeconomic profile of exposed areas**. Cadernos de Saúde Pública, v. 41, e00228723, 2025.
- BARRAGAN, O. L. V. **Caracterização geoquímica de óleos da América**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica do Petróleo e Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.
- BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 269, de 14 de setembro de 2000. Regulamenta o uso de dispersantes químicos em derrames de óleo no mar. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 12 jan. 2001.
- CALDAS, A. S. **Aproveitamento do resíduo de coco verde (Cocos nucifera L.) como sorvente em derramamento de petróleo em ambiente marinho**. Salvador, 2011.
- CANTAGALLO, C.; MILANELLI, J. C. C.; DIAS-BRITO, D. Limpeza de ambientes costeiros brasileiros contaminados por petróleo: uma revisão. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 2, n. 1, p. 1–12, 2007.
- CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. S.; OLIVEIRA, O. M. C.; LOBATO, A. K. C. L. **Bio-based sorbents for marine oil spill response: advances in modification, circularity, and waste valorization**. Resources, v. 14, n. 9, 2025.
- CHANG, H. K. *et al.* Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Baía de Santos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 29–46, 2008.
- CRAIG, A. P. L. *et al.* **Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar**. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas, Aracaju, v. 1, n. 15, p. 75–86, 2012.
- FERRÃO, C. M. **Derramamentos de óleo no mar por navios petroleiros**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

IFELEBUEGU, O. A.; NGUYEN, T. V. A.; UKOTIJE-IKWUT, P.; MOMOH, Z. Liquid-phase sorption characteristics of human hair as a natural oil spill sorbent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 2, p. 938–943, 2015.

INTERNATIONAL PETROLEUM INDUSTRY ENVIRONMENTAL CONSERVATION ASSOCIATION (IPIECA). **Biological impacts of oil pollution: saltmarshes**. London: IPIECA, 1994. (Report Series, v. 6). Disponível em: <https://www.ipieca.org>. Acesso em: 20 jul. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Manchas de óleo no litoral do Nordeste**. Brasília, DF: IBAMA, 2020. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/manchasdeoleo>. Acesso em: 5 jul. 2025.

INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION (ITOPF). **Fate of oil spills**. London: ITOPF, 2015. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills>. Acesso em: 23 jul. 2026.

INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION (ITOPF). **Oil tanker spill statistics 2024**. London: ITOPF, 2024. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2024/>. Acesso em: 28 de maio de 2025.

JAGABA, A. H. *et al.* **Diverse sustainable materials for the treatment of petroleum sludge and remediation of contaminated sites: a review**. *Cleaner Waste Systems*, v. 2, art. 100010, 2022.

LANZILLOTTA, H. A. A. **Árvores de decisão como ferramentas de apoio à decisão**. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

LIU, G. *et al.* **Modification of agricultural wastes to improve sorption capacities for pollutant removal from water: a review**. *Carbon Research*, v. 1, art. 24, 2022.

LOPES, C. F.; MILANELLI, J. C. C.; POFFO, I. R. F. **Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza: manual de orientação**. São Paulo: CETESB, 2007.

MACHADO, E. L. **Economia de baixo carbono: petróleo e petroquímica**. São Paulo, v. 1, p. 1–27, 2013.

MOREIRA, Í. T. A. *et al.* Spatial distribution and concentration assessment of total petroleum hydrocarbons in the intertidal zone surface sediment of Todos os Santos Bay, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, p. 1271–1280, 2014.

NOAA. **Deepwater Horizon oil spill**. Silver Spring, MD: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2015. Disponível em: <http://response.restoration.noaa.gov/taxonomy/term/188/all>. Acesso em: out. 2025.

OLIVEIRA, E. C. **Estudo dos compostos nitrogenados em fração do petróleo**. 2004. 115 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, O. M. C. de *et al.* **Environmental disaster in the northeast coast of Brazil: forensic geochemistry in the identification of the source of the oily material**. Marine Pollution Bulletin, v. 160, art. 111597, 2020.

PETERS, K. E.; WALTERS, C. C.; MOLDOWAN, J. M. **The biomarker guide**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 2 v.

PETROBRAS. **Bacias**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2015. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>. Acesso em: out. 2026.

PETROBRAS. **Geoquímica del petróleo**. Rio de Janeiro: CENPES, 1984.

REYES, C. Y. *et al.* **Weathering of petroleum biomarkers: review in tropical marine environment impacts**. Open Access Library Journal, v. 1, p. 1–16, 2014.

SOUSA JUNIOR, C. S. **Comportamento reológico de dispersões aquosas em óleo leve pesado**. In: Congresso Brasileiro De Pesquisa E Desenvolvimento Em Petróleo E Gás, 5., 2009, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2009. p. 1–7.

UNITED STATES. **Environmental Protection Agency (EPA)**. Oil spill prevention, preparedness and response: response techniques – sorbents. Washington, DC: EPA, 1999.

VENKATRAMAN, G. *et al.* **Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: a detailed review**. Chemosphere, v. 351, art. 141227, 2024.

WANG, W.; ZHENG, Y.; LEE, K. **Chemical dispersion of oil with mineral fines in a low-temperature environment**. Marine Pollution Bulletin, v. 72, n. 1, p. 205–212, 2013.

YANG, C.; WANG, Z.; YANG, Z.; HOLLEBONE, B.; FIELDHOUSE, B.; LAMBERT, P.; FINGAS, M. **Chemical fingerprints and chromatographic analysis of crude oils and petroleum products**. In: FINGAS, M. The chemistry of oil and petroleum products. Berlin: De Gruyter, 2022. cap. 2, p. 47–126.