
The use of bioremediation as a technique to treat oil-contaminated effluents

O uso da biorremediação como técnica para tratar efluentes contaminados por petróleo

Received: 15-06-2024 | Accepted: 19-07-2024 | Published: 23-07-2024

Felícia Saskia do Amaral Vasconcelos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0791-8055>
Universidade Estadual do Rio Grande do Norte, País
E-mail: feliciasaskia@alu.uern.br

Regina Célia Pereira Marques

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5172-0441>
Universidade Estadual do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: reginamarques@uern.br

Wyllame Carlos Gondim Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3134-5795>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: wyllame@ifce.edu.br

ABSTRACT

Demographic growth has increased the demand for natural resources, especially in oil exploration, which, despite its benefits, has negative environmental and social impacts. The occurrence of environmental accidents, such as oil spills, highlights the need for effective remediation methods. Bioremediation, using microorganisms or plant products, has emerged as a promising technique for treating contaminated effluents. This study analyzes the effectiveness of the main bioremediation techniques, highlighting advantages such as low cost, easy implementation and sustainability compared to other remediation techniques, being sustainable, not causing disruption to ecosystems and aiming exclusively at the biodegradation of petroleum polluting compounds.

Keywords: Bioremediation; Petroleum; Microorganisms.

RESUMO

O crescimento demográfico aumentou a demanda por recursos naturais, especialmente na exploração petrolífera, que, apesar de seus benefícios, acarreta impactos ambientais e sociais negativos. A ocorrência de acidentes ambientais, como derramamentos de petróleo, ressalta a necessidade de métodos eficazes de remediação. A biorremediação, utilizando microrganismos ou produtos vegetais, têm se destacado como uma técnica promissora para tratar efluentes contaminados. Este estudo analisa a eficácia das principais técnicas de biorremediação, destacando vantagens como baixo custo, fácil implementação e sustentabilidade em comparação com outras técnicas de remediação, sendo sustentável, não causando perturbações nos ecossistemas e visando exclusivamente à biodegradação dos compostos poluentes do petróleo.

Palavras-chave: Biorremediação; Petróleo; Microrganismos.

INTRODUÇÃO

Num mundo cada vez mais globalizado, a demanda por recursos naturais está em constante crescimento. No entanto, a exploração de reservas florestais, depósitos de petróleo e aquíferos tem acarretado significativos impactos ambientais negativos. Dentro deste contexto, o uso indiscriminado de combustíveis, impulsionando a máquina da exploração ambiental, coloca o petróleo e seus derivados no centro das atenções, sendo uma das principais causas de acidentes ambientais.

O petróleo, uma complexa mistura apolar de vários compostos, principalmente hidrocarbonetos, apresenta características físicas e químicas variáveis de acordo com sua finalidade, o que torna especialmente desafiador o manejo de áreas contaminadas (ANDRADE et al, 2010).

De acordo com o Anuário Estatístico de 2022, o número de relatos de incidentes aumentou significativamente desde 2014, refletindo uma tendência natural devido ao aumento da exploração de recursos, especialmente na camada do pré-sal. Entre 2017 e 2018, houve uma ligeira redução, mas a média anual de comunicações permaneceu em torno de 1.940.

Na busca por medidas alternativas que minimizem tais desastres, estudos recentes apontam para uma abordagem contrária à poluição: a biorremediação. Segundo ensaios realizados por Quintella et al. (2019), Stelika e Kluk (2020), e Zhang et al. (2018), entre as técnicas de remediação que permitem a remoção de contaminantes, a biorremediação se destaca por envolver agentes naturais protagonistas, como microorganismos, enzimas ou plantas (GAUR et al., 2014).

A biorremediação é predominantemente aplicada em matrizes como solo, fluidos e vários tipos de águas residuais (ZHANG et al., 2016). Sua atratividade reside na relação custo-eficácia, baixa necessidade de manutenção e compatibilidade ambiental, podendo reduzir ou eliminar resíduos indesejáveis. Por esses motivos, a limpeza de ambientes contaminados por hidrocarbonetos apresenta alta eficácia quando se utilizam técnicas de biorremediação (QUINTELLA, 2019).

Embora o método seja amplamente debatido e sua eficácia comprovada em outros países, o Brasil ainda permanece em uma fase predominantemente teórica, realizando estudos com poucos exercícios práticos ou em larga escala, resultando em uma baixa produtividade (QUINTELLA, 2019).

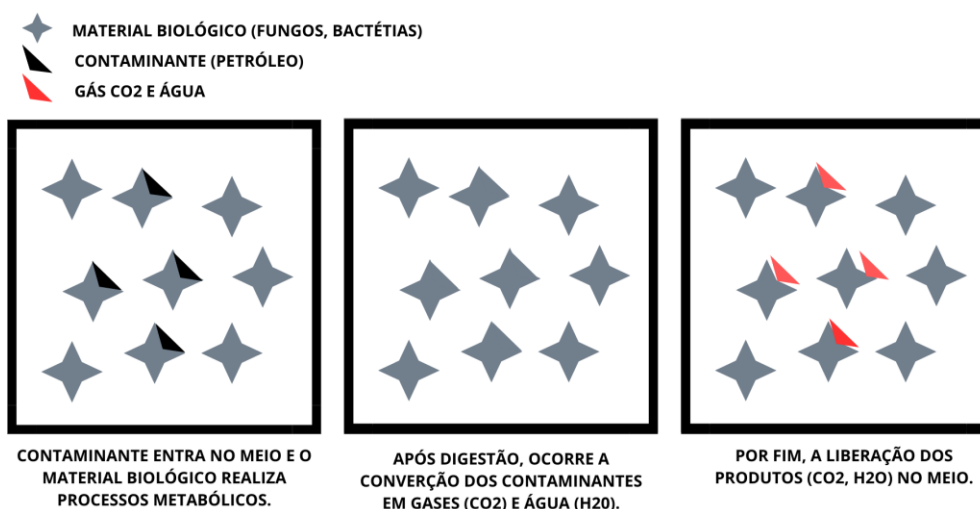
REFERENCIAL TEÓRICO

Os estudos pioneiros nessa área foram realizados por Zobell (1946), onde foi observada a presença de microorganismos capazes de utilizar compostos de carbono e hidrogênio para suas atividades metabólicas, conforme critérios químicos e ambientais.

A ação biológica de decomposição dos hidrocarbonetos pode gerar compostos com propriedades carcinogênicas e mutagênicas, responsáveis por diversos casos de câncer em seres humanos, como pulmão, intestino, fígado e pâncreas, devido à sua lipossolubilidade à membrana plasmática e acúmulo nos adipócitos (JACQUES, 2007). Além disso, devido à sua baixa solubilidade em água e complexidade estrutural, os hidrocarbonetos apresentam-se como agentes recalcitrantes no solo, permanecendo por longos períodos (JACQUES, 2007).

Quando ecossistemas naturais são poluídos por resíduos de petróleo, as comunidades microbianas desenvolvem estratégias de sobrevivência, incluindo o uso desses contaminantes como fonte de carbono, muitas vezes por meio de interações entre diferentes espécies. Por esse motivo, bactérias e fungos são frequentemente empregados em processos de biorremediação. No entanto, essa utilização deve ser feita com cautela, pois as consequências podem ser mais danosas ao meio ambiente do que o próprio petróleo, conforme a figura 1.

Figura 1 - Etapas da ação do microrganismo no processo de biorremediação.



Fonte: Autores (2024).

Além das bactérias, a capacidade de degradar hidrocarbonetos também é observada em fungos, leveduras e algas. Apesar de menos mencionado, há um aumento significativo no uso de fungos filamentosos e seus subprodutos em processos de

biorremediação. Isso se deve ao fato de que esses fungos apresentam uma alta capacidade de degradação e bioissorção, especialmente para metais e corantes, além de possuírem mecanismos de resistência em condições ambientais desfavoráveis (DE SOUSA, 2016).

Segundo Silva (2007), os organismos mais utilizados na degradação do petróleo são as bactérias, essas são divididas em grupos que classificam as diferentes espécies responsáveis pela limpeza da área, alguns exemplos:

- **Naftaleno:** *P. stutzeri*, *Cycloclasticus sp.*, *Bacillus cereus*, dentre outras.
- **Fenantreno:** *Rhodotorula glutinis*, *Nocardioides sp.*, *Flavobacterium gondwanense*, dentre outras.
- **Antraceno:** *Sphingomonas sp.*, *Comamonas testosteroni*, *Cycloclasticus pugetii*, etc.

Alguns produtos produzidos por bactérias que provocam a redução da tensão superficial entre membrana que separa água e óleo são denominados biossurfactantes. São responsáveis pela emulsificação desses dois líquidos, que facilita a degradação posterior do petróleo. A temperatura é importante para determinar a ação microbiológica, atuando nas características físicas e na composição química e valorização na viscosidade do óleo e no metabolismo bacteriano.

Os microrganismos modificados em laboratório podem ser selecionados para apresentarem baixa competitividade com o objetivo de serem eliminados ou, ainda, para perderem as características especiais de recombinação após um certo tempo de vida, sendo, assim, pouco competentes para a sobrevivência no ambiente natural.

Quando o poluente é o único substrato para crescimento microbiano, a multiplicação das células terminará na presença de baixos níveis do mesmo. Esta é uma boa maneira de controlar a população, porém isso pode acontecer antes que a concentração do poluente atinja o nível desejado. Felizmente, esse problema pode ser superado com engenharia genética, utilizando promotores induzidos pela deprivação de nutrientes. Como exemplo, podemos citar os genes T4MO (tolueno 4-monoxigenase) de *Pseudomonas mendocina* KR1, que foram clonados sob o controle do gene *groEL*. A bactéria geneticamente modificada promoveu, nas mesmas taxas, a degradação de tolueno, fenol e tricloretileno sob condições adequadas e sub-ótimas de glicose, nitrogênio e fósforo (GAYLARD et al,2005).

Com o advento da produção submarina, os biofilmes começam a aderir às superfícies de vários materiais, formando estruturas de dimensões micrométricas que se acumulam e chegam a atingir espessuras de até 4mm. O problema é que esses biofilmes prejudicam a exploração de petróleo, pois aderem ao interior dos dutos e causam corrosão, sendo difícil removê-los dos equipamentos (DE LIMA, 2015).

Existe discordância em relação ao papel das bactérias aeróbicas na biodegradação do petróleo, uma vez que estudos indicam que o oxigênio dissolvido na água do ambiente é rapidamente consumido em reações de oxidação do meio mineral em que está dissolvido. Uma solução seria reduzir a disponibilidade de oxigênio no ambiente, o que tornaria impossível para as bactérias aeróbicas sobreviverem e, conseqüentemente, degradarem o petróleo (DE LIMA, 2015).

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste documento é a exploratória-/descritiva, caracterizada como um estudo onde se busca compreender melhor o problema e construir questões pertinentes sobre seu escopo, buscando relatar e comparar as informações e resultados obtidos nos objetos de estudo (RAUPP; BEUREN, 2006).

Os artigos e pesquisas foram coletados do site Google Acadêmico, priorizando o período de 2010 à 2023, porém mantendo os embasamentos clássicos. Foram utilizadas as palavras chaves “biorremediação”, “petróleo” e “microorganismos”, envolvendo o levantamento e seleção de materiais já publicados, englobando repositórios de instituições acadêmicas e universidades, e editoras acadêmicas e científicas. O Google Acadêmico utiliza algoritmos de busca e indexação para organizar e apresentar os resultados de forma relevante aos usuários com base em uma variedade de fatores, como citações, relevância, qualidade do conteúdo, entre outros. Com isso, após a análise dos dados e organização do material, as temáticas foram agrupadas de acordo com a similaridade de conteúdo, o que possibilitou uma compreensão mais abrangente do assunto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para garantir a otimização do processo de biorremediação e sua adequação aos diferentes locais afetados, torna-se inevitável realizar uma análise dos parâmetros físicos, químicos e biológicos envolvidos (BUENO, 2008).

Esses elementos, que podem influenciar a biodegradação, incluem a composição da matriz ambiental (como pH, salinidade, potencial redox), fatores externos (como temperatura, umidade) e características do poluente (como estrutura química, presença de outros compostos, biodisponibilidade) (SILVA, 2023).

Existem três principais técnicas de biorremediação: bioestimulação, bioaumentação e atenuação natural. Essas podem ser realizadas *in situ*, no próprio local afetado, ou *ex situ*, quando o contaminante é removido e tratado em outro ambiente para análise. A escolha entre essas abordagens depende do tipo de poluente, sua concentração, os custos de implementação e outros fatores que influenciam o tratamento adequado para uso futuro da área (MORAIS FILHO; AZEVEDO, 2016).

A bioestimulação envolve estimular a reprodução e aumentar as taxas metabólicas dos microrganismos já presentes no meio, mas cujas condições ambientais não são favoráveis para a degradação dos contaminantes. Isso é feito adicionando oxigênio, nutrientes e água para criar um ambiente propício à multiplicação dos microorganismos. Na bioaumentação, quando não há uma quantidade suficiente de organismos microscópicos no local, os microrganismos são cultivados em laboratório e então reintroduzidos em maior quantidade no ambiente afetado para facilitar a biodegradação. Por fim, a atenuação natural depende da capacidade dos microrganismos nativos degradarem o contaminante, sem intervenção humana para alterar o ambiente. No entanto, devido à sua natureza lenta, é geralmente combinada com outras técnicas para maior eficácia.

A passagem de um estado sólido insolúvel para a fase aquosa dos metais é chamada de mobilização. Os microrganismos podem mobilizar os metais da lixiviação autotrófica e heterotrófica (PÉREZ, 2006).

No processo *in situ*, são utilizados produtos derivados do metabolismo de fungos e bactérias conhecidos como biossurfactantes. Diante das limitações dos surfactantes sintéticos, como a falta de degradação, surgiu o interesse pelos surfactantes de origem microbiana. Esses surfactantes são produzidos por certas bactérias, leveduras e fungos e têm ganhado destaque devido à sua baixa toxicidade, natureza biodegradável e eficiência em uma ampla gama de condições, incluindo temperaturas extremas, pH e salinidade. Além disso, desempenham um papel importante na recuperação de ecossistemas, acelerando a biodegradação de hidrocarbonetos oriundos de vazamentos (SANTOS et al., 2010).

Na biorremediação *in situ*, a degradação dos contaminantes ocorre no próprio local contaminado. As técnicas *in situ* geralmente visam aumentar a atividade microbiana local, modificando a área contaminada. Isso pode envolver a adição de nutrientes, ajuste do pH, controle da umidade e aeração, criando condições ideais para a degradação biológica dos componentes tóxicos (DE SOUSA, 2016).

A remediação *in situ* é preferível em muitos casos, pois evita a necessidade de mover materiais contaminados para fora do local. No entanto, é essencial monitorar e controlar o ambiente com equipamentos especializados para garantir que o processo ocorra de maneira eficaz e segura. O uso desses equipamentos é fundamental para o sucesso da remediação *in situ*.

A escolha do método a ser utilizado depende do tipo de ecossistema afetado, considerando suas características e níveis de sensibilidade, além do tipo de óleo derramado e fatores técnicos, como disponibilidade de equipamentos adequados e custo operacional (CANTAGALLO, 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biorremediação é um método de tratamento que utiliza microrganismos degradadores para converter compostos orgânicos em áreas contaminadas em substâncias mais simples e facilmente degradáveis. Essa abordagem oferece uma alternativa viável e econômica para recuperar áreas contaminadas, podendo ser aplicada em campo aberto ou em sistemas fechados.

A escolha da forma de aplicação da biorremediação é baseada em uma análise detalhada do local, tipo de poluente e viabilidade econômica, visando a melhor recuperação das águas contaminadas. Métodos utilizados priorizam a redução do volume, toxicidade e concentração dos resíduos, evitando o transporte ou rearranjo de elementos perigosos antes do tratamento.

Comparada com outras técnicas de remediação, a biorremediação apresenta várias vantagens, sendo ambientalmente amigável e não perturbando o equilíbrio dos ecossistemas. Seu foco exclusivo na biodegradação de compostos poluentes resulta na redução da concentração e toxicidade desses compostos, com potencial para gerar menos resíduos necessitando de tratamento adicional. Essa eficiência torna-a ideal para degradar compostos derivados do petróleo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico 2022 - Dados Abertos**. Tabela 2.17 – Comunicação de Incidentes nas Atividades de Exploração e Produção – 2011 - 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario-estatistico-2022> . Acesso em: 23 de jun. 2023.

ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. **Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados**. Eclética Química, Vol. 35, no 3, 2010.

BUENO, S. M. **Bactérias produtoras de biossurfactantes: Isolamento, produção, caracterização e Comportamento num sistema modelo**. 2008.

CANTAGALLO, Camila; CARLOS, João C. Milanelli; DIAS, Dimas Brito. **Limpeza de ambientes costeiros brasileiros contaminados por petróleo: uma revisão**. Disponível em: [https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_2\(1\)_1-12.pdf](https://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_2(1)_1-12.pdf). Acesso em: 12 maio. 2010.

DE LIMA, Ariadne SB et al. **A biorremediação como técnica de tratamento de efluentes contaminados por petróleo**. Blucher Chemistry Proceedings, v. 3, n. 1, p. 821-830, 2015.

DE SOUSA, K. C. **Biorremediação de solos contaminado por hidrocarbonetos utilizando fungos**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 14, n. 2, p. 43-52, 2016.

GAUR, N.; FLORA, G.; YADAV, M.; TIWARI, A. **A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals**. Environ. Sci. Process. Impacts. 16 (2), 180–193. 2014.

GAYLARDE, C. C; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. **Biorremediação**. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento, v. 34, p. 36-43, 2005.

IТОPF - International Tanker Owners Pollution Federation Limited – **“Technical Information Paper – Fate of Marine Oil Spills”**. Disponível em: <http://www.itopf.com/fate.html>, atualizada em 2006. acesso em 10 março 2024.

JACQUES, R. J. S.; BENTO, F. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; CAMARGO, F. A. O. **Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 37, n.4, p.1192-1201, julho-agosto, 2007.

MORAIS FILHO, M.; CORIOLANO, A. C. F. **Biorremediação, uma alternativa na utilização em áreas degradadas pela indústria petrolífera**. HOLOS, 7:133–150. 2016.

PEREZ. O.C. **Atenuación natural de suelos contaminados con residuos tóxicos de origen minero. Aislamento y caracterización microbiana**. Relatório interno de atividades da Faculdade de Biología. Universidad de La Habana, Habana, Cuba, 2006.

QUINTELLA, C. M., MATA, A. M. T., & LIMA, L. C. P. **Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils.** *Journal of Environmental Management*, 241, 156–166. 2019.

RAUPP, Fabiano Maury; BEUREN, Ilse Maria. Metodologia da pesquisa aplicável às ciências. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade: teoria e prática.** São Paulo: Atlas, p. 76-97, 2006.

SANTOS, S. C.; FERNANDEZ, L. G.; ROSSI-ALVA, J. C.; ROQUE, M. R. A. **Evaluation of substrates from renewable-resources in biosurfactants production by Pseudomonas strains.** *Afr. J. Biotechnol.*, v. 9, p. 5.704-5.711, 2010.

SILVA, Larissa Oliveira da. **Biorremediação em solo contaminado com óleo diesel S10 e avaliação da corrosividade do solo por meio das taxas de corrosão do aço-carbono A36.** 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, M G. **Biorremediação do solo contaminado por petróleo por diferentes técnicas de bioestimulação.** 2007. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/3642>>. Acesso em 5 de julho, 2021.

STELIGA, T.; KLUK, D. **Application of Festuca arundinacea in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110409. 2020.

ZHANG, S.; GEDALANGA, P. B.; MAHENDRA, S. **Advances in bioremediation of 1,4-dioxane contaminated waters.** *J. Environ. Manag.* 204, 765–774. 2018.

ZHANG, F. I. Xi An Huanuo Environment Protection. Assignee. **Composite Inoculant for Deep Oil Contaminated Soil Bioremediation Process.** China patent CN106244479. 2016.

ZOBELL, C. E. 1946a. **Action of microorganisms on hydrocarbons.** *Bacteriol. Rev.*, v.10, p.1-49.