

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Processos biológicos para tratamento de resíduos oleosos – estado da arte

AUTORES:

Leonardo Jordão da Silva^{1,2}, Flávia Chaves Alves², Francisca Pessôa de França²

INSTITUIÇÃO:

¹Ministério da Ciência e Tecnologia
CEP 70067-900 Brasília – DF. E-mail: leonardo.silva@mct.gov.br

²Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

PROCESSOS BIOLÓGICOS PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS OLEOSOS – ESTADO DA ARTE

Abstract

The oil industry activities result several impacts on the environment due to large amounts of oily waste are generated. The oily sludge is a semi-solid material composed by a mixture of clay, silica and iron oxides contaminated with oil, produced water and chemicals used in the production of oil. Nowadays both the treatment and management of these wastes is essential to promote sustainable management of exploration and exploitation of natural resources. Biological processes can be used single and/or combined in order to reduce environmental contamination by petroleum hydrocarbons into acceptable levels. The choice of treatment method depends on the waste physical-chemical properties as well as the availability of facilities to process these materials. Literature provides some operations and strategies for treatment and final disposal of oily waste, such as landfarming, biopiles and bioreactors. The management of technology to be applied for the treatment of oily waste is essential to promote proper environmental management, prevailing alternatives to reduce, reuse and recycling the residue.

Introdução

Resíduos sólidos na forma de lamas e borras oleosas são geradas pelas diversas atividades da indústria do petróleo (perfuração, produção, transporte, processamento e distribuição) (OLLIVIER & MAGOT, 2005). Na etapa de processamento do petróleo em refinarias ocorre geração de resíduos sólidos nas unidades de separação (colunas de destilação – atmosférica e à vácuo – separadores de água-óleo, dessalinizadores, etc.), nas operações de conversão (craqueamento térmico e catalítico, coqueamento, alquilação, hidrotratamento, etc.), no tratamento de efluentes (Tratamento Bender, Merox, DEA, etc.) e nas operações auxiliares (trocadores de calor, tanques de estocagem, torres de resfriamento, etc.) (MARIANO, 2005).

Os resíduos gerados nas refinarias são classificados como perigosos (Classe I) de acordo com a norma técnica NBR ISO 10004 (ABNT, 2004), devido a presença de compostos tóxicos como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (benzo[a]antraceno, benzo[a]pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, dibenzo[a,h]antraceno, indeno[1,2,3-cd]pireno, entre outros), metais pesados (cádmio, mercúrio, cromo, prata, arsênio, níquel, etc.), bifenilas policloradas (PCB) e hidrocarbonetos halogenados.

A borra oleosa, que é o resíduo oleoso mais abundante nas refinarias, é um material com aspecto pastoso, semissólido, constituído de areia (mistura de argila, sílica e óxidos) contaminada com óleo, água produzida e produtos químicos utilizados no processamento do petróleo (HEIDARZADEH et al., 2010). A redução, reutilização e/ou reciclagem de tais resíduos constituem ferramentas de grande importância na definição de políticas de gestão sustentável das empresas petrolíferas (LADISLAO, 2008).

Os resíduos oleosos podem ser tratados por diversos processos biológicos ou físico-químicos. A aplicação de processos biológicos ao tratamento de borras oleosas tem despertado grande interesse das comunidades científica e industrial. São processos de tratamento que utilizam organismos (bactérias, fungos e/ou vegetais) para reduzir ou eliminar compostos orgânicos perigosos ao meio ambiente (PAUDYN et al., 2007).

Dentre as tecnologias de tratamento de borras oleosas, destacam-se os processos de landfarming, biopilha e biorreatores. O gerenciamento de resíduos oleosos envolve a caracterização da

borra oleosa (propriedades físicas, físico-químicas e químicas) em confluência com as características das tecnologias de tratamento desses resíduos. A análise e caracterização da borra oleosa, a quantidade gerada e a disponibilidade de equipamentos são variáveis importantes para o dimensionamento da tecnologia de tratamento que será aplicada ao tratamento de borra oleosa gerada numa determinada refinaria de petróleo (GUSTI, 2009). Na caracterização da borra oleosa deve-se priorizar a quantificação dos parâmetros mais relevantes para serem correlacionados com as especificidades de cada método de tratamento.

Os micro-organismos, responsáveis pela biodegradação, são bactérias aeróbias e anaeróbias, fungos e microalgas. Os hidrocarbonetos do petróleo podem ser metabolizados através da respiração aeróbia ou anaeróbia. As diversas classes de hidrocarbonetos apresentam diferenciada susceptibilidade ao ataque microbiano. Os hidrocarbonetos mais simples, ou seja, os alifáticos de cadeia curta não ramificada são os mais facilmente decompostos, por outro lado, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos requerem maior tempo para a decomposição (OLIVEIRA & de FRANÇA, 2005).

De acordo com Hamdi et al. (2007), a tecnologia landfarming apresenta excelente relação custo-benefício quando comparada aos demais processos de tratamento de resíduos sólidos. Para tal algumas técnicas operacionais devem ser rigorosamente obedecidas a fim de obter significativa biodegradação de hidrocarbonetos. Entretanto, Ururahy et al. (1998) enfatizam que os processos de landfarming e biopilhas demandam grandes extensões de terreno e elevado tempo de biodegradação dos hidrocarbonetos.

O objetivo deste trabalho foi analisar as diferentes opções de tratamento biológico de borras oleosas. Este trabalho prevê o mapeamento das tecnologias disponíveis através de pesquisas em dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos científicos, patentes, relatórios técnicos e experiência profissional de campo.

Resultados e Discussão

Histórico do tratamento e disposição final de borra oleosa

No início da década de 1950 não havia disposições tecnológicas para o tratamento e/ou reaproveitamento de borras oleosas geradas pela indústria do petróleo. Sendo assim, o destino destas eram em lagoas ou diques. Em alguns casos, a borra era descartada em trincheiras ou colocadas em tambores e depois enterrados, sem nenhum preparo da área, ou seja, sem uma gestão ambiental adequada (MARIANO, 2005).

Com o passar dos anos, estes locais tornaram-se o principal foco de contaminação do solo e, posteriormente, devido a liquefação da borra seguida de percolação e infiltração das águas pluviais, acarretou sua migração e de seus contaminantes para os aquíferos subterrâneos. As principais contaminações originadas são de hidrocarbonetos alifáticos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) e metais pesados.

A partir da década de 1960 surgem os princípios da sustentabilidade, como um processo de melhoria dos indicadores sociais e ambientais visando a preservação ambiental. Nos anos 80, o afloramento da conscientização dos problemas ambientais decorrentes da destinação inadequada dos grandes volumes de resíduos industriais produziu ao controle da geração, regularização, destinação desses poluentes e a necessidade da adoção de novas posturas pelo setor industrial em relação ao seu gerenciamento.

O tratamento de resíduos oleosos se faz necessário para prevenção da contaminação do solo visando à manutenção de sua funcionalidade e a proteção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, que são bens públicos e reservas estratégicas para o abastecimento público e o

desenvolvimento ambientalmente sustentável. Os processos biológicos disponíveis para o tratamento de borra oleosa são: *landfarming*; biopilha; e biorreatores. Estes processos serão detalhados a seguir.

Landfarming

A utilização do solo para o tratamento de resíduo teve início na Europa no final do século XIX com a técnica de irrigação de áreas cultivadas com águas residuárias sanitárias. No início dos anos 50, o processo de tratamento no solo despertou interesse nas empresas de refino de petróleo dos Estados Unidos, sendo as primeiras a desenvolver e praticar o tratamento no solo para seus resíduos e, para este processo de tratamento específico, elas deram o nome de *landfarming* (GENOUW *et al.*, 1994).

No Brasil, o *landfarming* foi introduzido pela PETROBRAS quando, no ano de 1982, colocou em funcionamento uma unidade na Refinaria Henrique Lage, na cidade de São José dos Campos, Estado de São Paulo. Desde então, a PETROBRAS iniciou a implantação de *landfarming* em outras refinarias (CASTRO *et al.*, 2005).

O *landfarming* é uma tecnologia de biorremediação na qual os resíduos são espalhados e misturados à camada reativa do solo, de forma controlada, a fim de que a própria microbiota do solo atue como agente de degradação. O processo é realizado em grandes áreas, já que a biodegradação se dá na camada superior do solo, onde a aerobiose é garantida. Os hidrocarbonetos no solo podem sofrer volatilização e biodegradação (MPHEKGO & CLOETE, 2004).

A norma NBR ISO 13.894 (ABNT, 1997) estabelece que o projeto, construção, operação e manutenção da unidade devem ser realizados de forma a elevar ao máximo a degradação, a transformação e/ou imobilização de contaminantes da camada reativa do solo.

A construção de um *landfarming* previne ou minimiza a transferência de contaminantes para áreas adjacentes devido a existência de uma barreira lateral e camada impermeabilizante, que pode ser de polietileno de alta densidade ou argila compactada. A Figura 1 apresenta o sistema sob perspectiva superior.

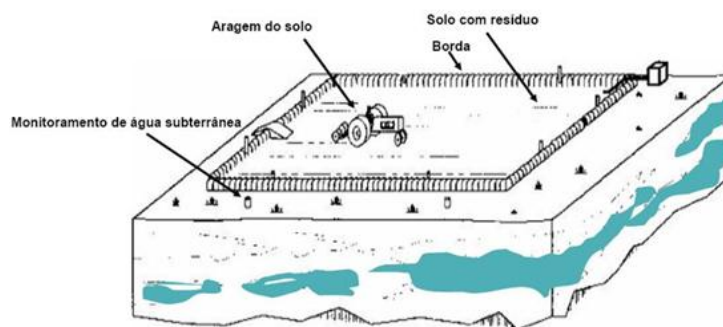


Figura 1: Sistema de *Landfarming* – Perspectiva superior
Fonte: Adaptado de MPHEKGO & CLOETE, 2004

As técnicas operacionais envolvem adição de nutrientes, umidificação, aeração e correção de pH do solo. Os macronutrientes adicionados são compostos a base de nitrogênio, fósforo e potássio sob a forma de fertilizantes comerciais e/ou uréia (MPHEKGO & CLOETE, 2004). A correção do pH do solo pode ser feita pela adição de óxidos de cálcio e magnésio. A aeração do solo é viabilizada através de arado acoplado a trator (MARIN *et al.*, 2005).

Em trabalhos realizados no Laboratório de Microbiologia Aplicada a Indústria do Petróleo da UFRJ, foi avaliado o tratamento de resíduos oleosos em uma área de 1.000 m² de um *landfarming* localizado numa refinaria brasileira. Para tal foram empregadas metodologias operacionais de bioestimulação através de umidificação, fertilização e aeração. Paralelamente foi isolada uma área denominada de célula controle. Os resultados obtidos, em 225 dias de tratamento, foram promissores considerando o tempo e a concentração inicial de contaminantes. O teor de hidrocarbonetos totais do petróleo (HTP) decresceu 89,6% no solo tratado com uma taxa de degradação de 25,8 mg.kg⁻¹.dia⁻¹, enquanto o solo controle apresentou 22,4% de degradação (6,5 mg.kg⁻¹.dia⁻¹). A população de

bactérias aeróbias, fungos filamentosos e bactérias anaeróbias apresentou valor médio de $1,4 \times 10^7$, $2,6 \times 10^5$ UFC.g⁻¹ e $2,2 \times 10^6$ Cels.g⁻¹, respectivamente (SILVA *et al.*, 2009).

Hamdi *et al.* (2007) avaliaram a biodegradação específica de antraceno (ANT), pireno (PYR) e benzo[a]pireno (B[a]P), e empregaram técnicas de bioestímulo e bioaumento para a remoção desses compostos. Os autores observaram completa degradação de ANT e PYR em apenas 30 dias, mas B[a]P reduziu de 1.000 mg.kg⁻¹ para 420 mg.kg⁻¹ em 90 dias. A velocidade de biodegradação foi coerente com o número de anéis benzênicos, sendo maior para o ANT e PYR, que possuem 3 e 4 anéis respectivamente, e mais lenta para o B[a]P, que pode estar relacionada com a forte interação dos 5 anéis benzênicos com a matriz sólida, resultando em baixa transferência de massa para os micro-organismos. Dentre os HPA, o benzo[a]pireno é o mais preocupante porque acumula-se na cadeia alimentar com propriedades físico-químicas semelhantes as de muitos inseticidas organoclorados como DDT, dieldrin e antrazina (HARITASH *et al.*, 2009).

Biopilha

A tecnologia de biopilha envolve a construção de células ou pilhas de solo contaminado de forma a estimular a atividade microbiana aeróbia dentro da pilha através de uma aeração muito eficiente. A atividade microbiana pode ser aumentada pela adição de umidade e nutrientes como nitrogênio e fósforo. As bactérias degradam os hidrocarbonetos adsorvidos nas partículas de solo, reduzindo assim suas concentrações (OLLIVIER & MAGOT, 2005).

Tipicamente, as biopilhas são construídas sobre uma base impermeável para reduzir o potencial de migração do lixiviado para o ambiente subsuperficial. Uma malha de dutos perfurados instalados na base da pilha e conectados a um compressor que garante a perfeita aeração do conjunto. Em alguns casos, constrói-se um sistema de coleta para o lixiviado principalmente quando do uso de sistema de adição de umidade. As pilhas são, geralmente, recobertas por plástico para evitar a liberação de contaminantes para a atmosfera, bem como para protegê-la das intempéries (SEABRA *et al.*, 2006). A Figura 2 apresenta um esquema do processo de biopilha.

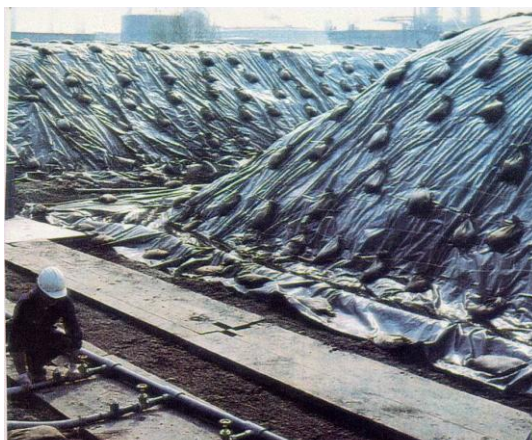


Figura 2: Esquema típico de um sistema de biopilha estática.
Fonte: SEABRA *et al.*, 2006

Ururahy *et al.* (1998) ressaltam que as formas mais comuns de aplicação da biotecnologia no tratamento de resíduos (*landfarming* e biopilhas) incorrem em elevados tempos de processo e em riscos acentuados de contaminação de aquíferos por lixiviação, além de serem altamente sensíveis as variações climáticas, demandarem grandes extensões de terreno e monitoramento constante.

Especificamente, a técnica de biopilha ainda oferece as seguintes desvantagens: pode não ser efetiva para altas concentrações de contaminantes (> 50.000 ppm de hidrocarbonetos totais de petróleo – HTP), concentrações superiores a 2.500 ppm de metais pesados inibem o crescimento microbiano, constituintes muito voláteis tendem a evaporar ao invés de serem biodegradados e os gases resultantes da aeração podem requerer tratamento antes do descarte para a atmosfera. Os solos contaminados geralmente são pobres em matéria orgânica apresentando baixa atividade microbiana. Dessa maneira, a taxa de biodegradação do poluente pode ser afetada negativamente.

Kriipsalu *et al.* (2008) avaliaram a biodegradação de borra oleosa proveniente de unidades de floculação-flotação, através do processo de biopilhas com diferentes materiais estruturantes: areia; resíduo oleoso maturado; resíduos alimentícios; resíduo de madeiras cortadas. Os resultados indicaram que o material estruturante de resíduos alimentícios permitiu uma maior degradação de HTP e HPA.

Biorreatores

Biorreatores de vários tipos têm sido desenvolvidos principalmente para o tratamento de efluentes líquidos, entretanto tais sistemas atualmente também estão sendo usados para resíduos sólidos. Podem ser extremamente úteis em degradar compostos altamente recalcitrantes (RISER-ROBERT, 1998).

Geralmente, nos biorreatores os micro-organismos podem ser utilizados de duas formas distintas: livres ou imobilizados. No entanto, somente a primeira forma tem sido utilizada para tratar resíduos sólidos. Nela, os micro-organismos são mantidos em suspensão, podendo crescer livremente no seio do meio líquido ou aderidos ao solo que está em suspensão. Estes biorreatores podem ser agitados mecanicamente ou por injeção contínua de ar. A Figura 3 apresenta o esquema de um biorreator.

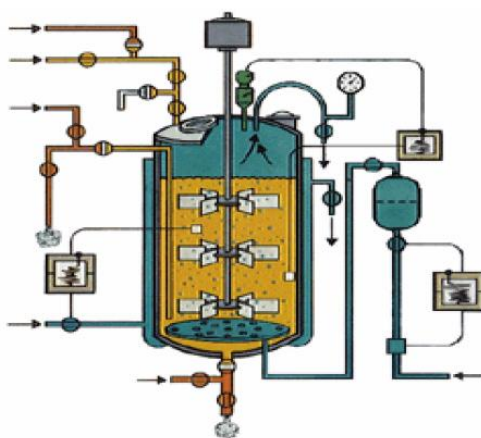


Figura 3: Biorreator agitado mecanicamente

Fonte: Pereira Jr. *et al.* (2008)

O tipo mais comum no tratamento de solo contaminado consiste em sistemas que operam em fase semi-sólida, com uma porcentagem de água variando entre 40 e 90% (v/v). Ururahy *et al.* (1998) defendem a técnica de tratamento em biorreatores. Sob a ótica destes autores, os bioprocessos apresentam melhores vantagens frente a incineração, visto que esta última demanda altos custos energéticos, e o co-processamento, necessita do reprocessamento das borras no próprio refino ou em outras unidades industriais (cimenteiras e olarias).

Entretanto esta tecnologia possui algumas desvantagens, tais como: os custos são mais altos do que os tratamentos *in situ*, pois há gastos adicionais com o transporte do material contaminado, construção de equipamentos para uma particular descontaminação, mão-de-obra adicional e energia (ALSHAMMARI *et al.*, 2008).

De acordo com Ward *et al.* (2003), um sistema de biorreator com capacidade de $4,55 \times 10^6$ litros foi usado para tratar resíduos oleosos na refinaria da Costa do Golfo, uma das maiores do mundo. O volume nominal de sólidos foi de 10%. Um sistema de aeração e agitação foi utilizado para aumentar a biodegradação. O bioprocessos foi inoculado com micro-organismos hidrocarbonoclásticos, com destaque para os gêneros *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Ochrabactrum*, *Pseudomonas/Flavimonas*, *Rhodococcus* e *Stenotrophomonas*. A redução de 50% de óleos e graxas ocorreu entre 80 a 90 dias.

A patente PI 0502090-5 A (“Biorreator horizontal e processo de biorremediação de solos argilosos utilizando dito biorreator”) diz que quando comparado com as técnicas clássicas de biorremediação, como *landfarming* e biopilhas, o emprego de biorreatores apresenta como principais vantagens: controle de emissões atmosféricas e da geração de águas de processo; controle e

manutenção das condições operacionais (pH, temperatura, teor de umidade, etc.); garantia do grau de mistura adequado (agitação contínua ou descontínua); monitoramento mais efetivo da degradação dos poluentes; possibilidade de incorporação de aditivos diretamente no reator (água, micro-organismos, surfactantes, nutrientes, corretivos de pH, co-substratos, etc.); sistema de aeração facilitado; inexistência de contato direto entre o conteúdo do reator (poluentes) e o ambiente durante o processo de tratamento, o que representa ganhos ambientais e de segurança.

Conclusões

Dificuldades de acervo bibliográfico sobre o material estudado foram sentidas desde o início da pesquisa, o que é de certo modo compreensível do ponto de vista empresarial, por se tratar de um resíduo perigoso gerado em abundância e que levou ao setor petrolífero se proteger, durante algum tempo, de possíveis multas, questionamentos e exigência para tomadas de medidas para redução, armazenamento, tratamento e destinação final com segurança ambiental, quando ainda não havia uma conscientização sobre a gravidade do tal resíduo e nem legislação ambiental. Os trabalhos existentes até o momento são de grande contribuição para o setor, especialmente no que condiz ao tratamento, reutilização e reciclagem da borra de petróleo. As tecnologias de *landfarming*, biopilhas e biorreatores representam grandes avanços para o tratamento de resíduos oleosos, promovendo a política de gestão integrada dos sistemas da qualidade, saúde, segurança e meio ambiente nas empresas petrolíferas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 13.894. Tratamento no Solo – *Landfarming*. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ALSHAMMARI, J. S.; GAD, F. K.; ELGUBALY, A. A. M.; KHAN, A. R. Solid waste management in petroleum refineries. *American Journal of Environmental Sciences*. n. 4, p. 353-361, 2008.
- CASTRO, R. A.; CARVALHO, F. J. PC.; KRENCZYNSKI, M. C.; GONÇALVES, C. M.; OLIVEIRA, S. C. T.; LIMA, V.; CREPLIVE, M.; JOANELLO Jr., L. A. Otimização do Sistema de *Landfarming* da RPBC – Refinaria Presidente Bernardes. In: *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, 2005.
- GENOUW, G.; DE NAEYER, F.; VAN MEENEN, P.; VAN DE WERF, H.; DE HIJS, W.; WESTRAETE, W. Degradation of oil sludge by landfarming a case-study at the Ghent harbor. *Biodegradation*. v. 5, p. 37-46, 1994.
- GUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*. n. 29, p. 2227-2239, 2009.
- HAMDI, H.; BENZARTI, S.; MANUSADZIANAS, L.; AOYAMA, I.; JEDIDI, N. Bioaugmentation and Bioestimulation effects on PAH dissipation and soil ecotoxicity under controlled conditions. *Soil Biology & Biochemistry*. v. 39, pp. 1926-1935, 2007.
- HARITASH, A. K.; KAUSHIK, C. P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*. n. 169, p. 1-15, 2009.

- HEIDARZADEH, N.; GITIPOUR, S.; ABDOLI, M. A. Characterization of oily sludge from a Tehran oil refinery. *Waste Management & Research*. n. 28, p. 921-927, 2010.
- LADISLAO, B. A. Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment. A review. *Environment International*. n. 34, p. 292-308, 2008.
- KRIIPSALU, M.; MARQUES, M.; NAMMARI, D. R.; HOGGLAND, W. Bio-treatment of oily sludge: The contribution of amendment material to the content of target contaminants, and the biodegradation dynamics. *Journal of Hazardous Materials*. n. 148, p. 616-622, 2008.
- MARIANO, J. B. Impactos Ambientais do Refino de Petróleo. 1 ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- MARIN, J. A.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity. *Environmental Research*. n. 98, p. 185-195, 2005.
- MPHEKGO, P. M.; CLOETE, T. E. Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages?. *Environmental Science & Bio/Technology*. n. 3, p. 349-360, 2004.
- OLLIVIER, B.; MAGOT, M. Petroleum Microbiology. Washington D.C.: ASM Press, 2005.
- OLIVEIRA, F.J.S.; de FRANÇA, F.P. Increase in removal of polycyclic aromatic hydrocarbons during bioremediation of crude oil-contaminated sandy soil. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. v. 121-124, pp. 593-603, 2005.
- Patente PI 0502090-5 A (“Biorreator horizontal e processo de biorremediação de solos argilosos utilizando dito biorreator”). Patente depositada em 09/06/2005.
- PAUDYN, K.; RUTTER, A.; ROWE, R.K.; POLAND, J.S. Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian arctic by landfarming. *Cold Regions Science and Technology*. pp.1-13, 2007.
- PEREIRA Jr. N.; BON, E. P. S.; FERRARA, M. A. Tecnologia de bioprocessos, v. 01, Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.
- RISER-ROBERT, E. Remediation of petroleum contaminated soils: biological, physical, and chemical process. Florida: CRC Press LLC, 1998.
- SEABRA, P. N. C.; SANT’ANNA Jr. G.; CARVALHO, D.; RIZZO, A. Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Tropical Soil in Bench-Scale Piles. *Environmental Engineering and Management Journal*. v.5, p. 399-406, 2006.
- SILVA, L. J.; OLIVEIRA, F. J. S.; de FRANÇA, F. P. Biodegradação de Resíduos Oleosos proveniente de Refinaria de Petróleo. In: 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2009.
- URURAHY, A. F. P.; PEREIRA Jr., N.; MARINS, M. D. M. Desempenho de um biorreator do tipo CSTR no processo de degradação de borra oleosa. *Boletim Técnico da Petrobras*. n. 41, p. 125-132, 1998.
- WARD, O.; SINGH, A.; HAMME, J. V. Accelerated biodegradation of petroleum hydrocarbon waste. *J Ind Microbiol Biotechnol*. n. 30, p. 260-270, 2003.