XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/123

Utilização de Composto Orgânico como Material Estruturante em Biopilhas para Tratamento de Solo Areno Argiloso Contaminado por Óleo Diesel

Antônio Italcy de Oliveira Júnior
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, antonioitalcy@hotmail.com

Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida
Doutora em Engenharia Civil (Geotecnia), UFMA, São Luís, Brasil, alice.almeida@ufma.br

Flávio Leôncio Guedes
Doutorando em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, f_l_guedes@hotmail.com

Leonardo José do Nascimento Guimarães
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, leonardo.guimaraes@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

Alison de Souza Norberto
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia), UFPE, Recife, Brasil, alison.norberto@ufpe.br

RESUMO: A contaminação de solos por derivados de petróleo, como o óleo diesel, altera significativamente suas características físicas e geotécnicas, sendo este um problema crítico em regiões semiáridas, onde o comportamento do solo não saturado é dominante. O presente trabalho investigou a técnica de biorremediação em biopilhas, utilizando o composto orgânico como material estruturante, para a remediação de um solo areno-argiloso da região semiárida do Nordeste brasileiro (Caruaru-PE) contaminado por óleo diesel. O experimento foi conduzido em escala de bancada durante 180 dias, em ambiente com controle de temperatura e umidade. As misturas avaliadas incluíram o solo contaminado (controle – Bioatenuação Natural, BAN – 0% de material estruturante) e bioestimulação com 5% e 10% de composto orgânico (BI5CO e BI10CO). A cada 15 dias, amostras foram coletadas em triplicata para determinações de hidrocarbonetos totais de petróleo, teores de carbono/nitrogênio e contagem de microrganismos. A técnica de biopilhas com composto orgânico demonstrou alta eficácia. A biopilha com 10% de composto orgânico promoveu a remoção de até 92,06% dos hidrocarbonetos totais de petróleo em 180 dias. Concluiu-se que o uso de composto orgânico em biopilhas é viável e eficiente para a remediação de solo areno-argiloso contaminado por óleo diesel, mitigando os efeitos adversos da contaminação.

PALAVRAS-CHAVE: Biorremediação, Solo Contaminado, Composto Orgânico.

ABSTRACT: Soil contamination by petroleum derivatives, such as diesel oil, significantly alters its physical and geotechnical characteristics. This is a critical issue in semi-arid regions, where unsaturated soil behavior is dominant. This study investigated the biopile bioremediation technique, using organic compost as a bulking agent, for the remediation of a sandy-clay soil from the semi-arid region of the Brazilian Northeast (Caruaru-PE) contaminated by diesel oil. The experiment was conducted at a bench scale for 180 days in a temperature- and humidity-controlled environment. The evaluated mixtures included the contaminated soil (control – Natural Bioattenuation, NBA – 0% bulking agent) and biostimulation with 5% and 10% organic compost (BI5CO and BI10CO). Every 15 days, samples were collected in triplicate to determine total petroleum hydrocarbons (TPH), carbon/nitrogen content, and microbial counts. The biopile technique with organic compost demonstrated high efficacy. The biopile with 10% organic compost promoted the removal of up to

92.06% of total petroleum hydrocarbons within 180 days. It was concluded that the use of organic compost in biopiles is a viable and efficient method for the remediation of sandy-clay soil contaminated by diesel oil, mitigating the adverse effects of contamination.

KEYWORDS: Bioremediation, Contaminated soil, Organic compost.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades industriais e o transporte de hidrocarbonetos têm gerado impactos ambientais significativos, resultando frequentemente na contaminação de solos e recursos hídricos. Dentre os poluentes, os derivados de petróleo, como o óleo diesel, destacam-se pela elevada ocorrência de derramamentos acidentais em rodovias e postos de revenda (Andrade *et al*., 2010). Esses contaminantes possuem o potencial de alterar drasticamente as características químicas e estruturais do solo, apresentando elevada complexidade de remediação devido ao caráter hidrofóbico de diversas frações de hidrocarbonetos (Rajabi e Sharifipour, 2019).

A avaliação do impacto de tais substâncias torna-se ainda mais crítica em regiões semiáridas, onde o comportamento do solo não saturado é dominante e os fatores climáticos intensos condicionam a dinâmica dos poluentes no subsolo. No Brasil, embora existam pesquisas sobre remediação, o tratamento de solos tropicais do interior do Nordeste sob o efeito de combustíveis ainda demanda estudos específicos devido à escassez de dados para essa região. Visto que a remoção completa do solo contaminado para disposição em aterros é economicamente onerosa e tecnicamente limitada, métodos sustentáveis de remediação biológica têm sido amplamente investigados (Schwarz e Krizek, 2006).

Dentre essas técnicas, a biorremediação em biopilhas destaca-se pela eficiência no tratamento de solos contaminados. Essa metodologia baseia-se na utilização de materiais estruturantes para criar uma matriz porosa que favorece a aeração e fornece nutrientes essenciais, otimizando o metabolismo da microbiota degradadora (Sathyapriya *et al*., 2023). A utilização de composto orgânico oriundo de resíduos agroindustriais como agente bioestimulante insere-se nos princípios da economia circular, ao transformar subprodutos em recursos valiosos para a recuperação ambiental. Essa abordagem não apenas dinamiza a aplicação desses materiais alternativos, mas também promove a inserção de resíduos em novos ciclos produtivos (Saviozzi *et al*., 2009).

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar a utilização de composto orgânico como material estruturante bioestimulante no tratamento de um solo areno-argiloso (classificado como SC) coletado na região de Caruaru-PE, contaminado artificialmente por óleo diesel. O foco central do estudo reside em analisar a eficácia da técnica de biopilhas na remoção de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP), buscando consolidar uma solução de baixo custo e alta eficiência para a remediação de solos em regiões de clima semiárido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado um solo de textura areno-argilosa coletado no município de Caruaru, Pernambuco, em uma região de clima semiárido. O solo foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos como SC. O combustível empregado para a contaminação artificial foi o óleo diesel comercial S10, adquirido no comércio local. Como material estruturante bioestimulante, utilizou-se um composto orgânico oriundo de um empreendimento agroindustrial situado no estado de Pernambuco.

A contaminação do solo foi realizada de forma controlada em laboratório para simular um cenário de derramamento severo. O solo, previamente seco ao ar e destorroado, foi misturado ao óleo diesel na proporção de 8% em relação à sua massa seca. A mistura foi realizada em bandejas metálicas, com a adição do contaminante em pequenas parcelas sob revolvimento constante para garantir a homogeneização. Após a incorporação do combustível, o material permaneceu em repouso por 48 horas em recipientes hermeticamente fechados para permitir a estabilização das interações físico-químicas entre o solo e o óleo diesel.

Foram montadas três configurações experimentais em duplicata para avaliar diferentes dosagens de composto orgânico em relação ao peso do solo contaminado. As misturas avaliadas incluíram o solo

contaminado (controle – Bioatenuação Natural, BAN – 0% de material estruturante) e bioestimulação com 5% e 10% de composto orgânico (BI5CO e BI10CO).

As misturas foram acondicionadas em bandejas com dimensões de 43,5 cm x 29,6 cm x 7,5 cm. O experimento teve duração total de 180 dias e foi conduzido em ambiente com controle de temperatura e umidade. A umidade das biopilhas foi monitorada e ajustada semanalmente para 70% da capacidade de campo, utilizando água destilada. Para garantir a aeração necessária à atividade microbiana aeróbica e o suprimento de oxigênio, realizou-se o revolvimento manual das pilhas uma vez por semana.

O monitoramento das biopilhas ocorreu durante 180 dias, com revolvimento manual e ajuste de umidade (70% da capacidade de campo) realizados semanalmente para garantir a aeração e a atividade microbiana aeróbica. Coletas de amostras em triplicata foram efetuadas quinzenalmente (de T0 a T180) para análise de Carbono Orgânico Total via método de Walkey-Black modificado, Nitrogênio Total pelo método de Kjeldahl (Mendonça e Matos, 2005) e o HTP conforme metodologia de Santos (2005). A atividade biológica foi monitorada pela contagem de microrganismos (BHT e FT), expressa em Unidades Formadoras de Colônias (Trindade, 2002).

A cinética de biodegradação do óleo diesel foi avaliada utilizando o modelo de decaimento de primeira ordem (Wiedemeier *et al*., 2007), conforme a Equação 1:

$$C = C_0 * e^{-kt} \quad (1)$$

Onde C é a concentração final de HTP, C_0 é a concentração inicial, k é a constante de decaimento (tempo^{-1}) e t é o tempo de análise. O uso deste modelo justifica-se pela baixa influência da volatilização em relação à biodegradação para o óleo diesel no solo (Namkonng *et al*., 2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de quantidade de hidrocarbonetos nas diferentes biopilhas durante todo o período de estudo.

Tabela 1. Concentração de hidrocarbonetos de petróleo nas diferentes biopilhas durante 180 dias de biodegradação.

Experimento	BAN (g/kg)	BI5CO (g/kg)	BI10CO (g/kg)
T0	6.308	6.308	6.308
T7	5.978	5.501	5.111
T15	5.614	5.017	4.874
T30	5.846	4.208	3.941
T45	4.749	3.814	3.654
T60	4.542	3.414	2.945
T75	4.749	3.115	2.448
T90	4.542	3.221	2.131
T105	4.601	2.685	1.746
T120	3.714	2.441	1.396
T135	3.303	1.987	996
T150	3.057	1.745	699
T165	3.010	1.346	546
T180	2.909	1.103	501
% Remoção de HTP	-53,88%	-82,51%	-92,06%

No tempo 0, foi realizado a quantificação de hidrocarbonetos as três biopilhas, mas como o solo contaminado era o mesmo em todas as biopilhas, realizou-se uma média dos valores obtidos e o gráfico das biopilhas partiram de uma concentração de 6.308 g/kg de HTP.

A primeira leitura foi realizada após 7 dias de montagem do experimento, as remoções de HTP nesse período inicial se deve fundamentalmente à volatilização do óleo diesel. Para Saviozzi *et al*. (2009), para contaminações com óleo diesel a parcela volatilizada é pequena e está relacionada com revolvimento das biopilhas para aeração.

Observa-se que as concentrações de HTP variaram de acordo com os teores de materiais estruturantes. No entanto, é importante salientar que devido à dificuldade em se obter um grau elevado de homogeneidade nas misturas "solo+contaminante+material" estruturantes nas biopilhas, justifica-se dessa forma a ocorrência por vezes de quantidade de hidrocarbonetos maiores do que nos resultados anteriores, conforme salientado por Morais (2005).

Ao avaliar os resultados de concentração de HTP das biopilhas, nota-se que o solo contaminado apresentou uma atenuação natural, resultando em uma redução de 53,88% de HTP após 180 dias de incubação. Dentre os tratamentos realizados com bioestímulo, utilizando material estruturante, observa-se que a adição de 10% de composto orgânico promoveu uma redução de 92,06% de HTP e a adição de 5% de composto orgânico promoveu uma redução de 82,51% de redução de HTP. Portanto, conclui-se que a adição do composto orgânico reduziu 1,63 vezes a mais do que a atenuação natural.

Como forma de avaliar o padrão de concentração de HTP em relação as legislações ambientais vigentes, a qualidade dos solos e das águas devido a acidentes relacionados a contaminação com combustíveis está relaciona com uma série de leis, resoluções e decretos municipais que visam mitigar os danos ambientais. Em 2009, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabeleceram a Resolução n° 420 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo em relação a presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas. Segundo a referida resolução são utilizados como padrão os valores orientadores para solos e águas subterrâneas da CETESB, que por sua vez se baseou na Lista Holandesa de valores de referência de qualidade do solo e da água subterrânea no ano de 1994. A lista Holandesa estabelece Valores de R (referência), A (Alerta) e I (Intervenção) para os HTP para um solo contendo 25% de argila e 10% de matéria orgânica, e contendo 0% de argila e 0% de matéria orgânica.

Na Tabela 2 é apresentada uma comparação dos valores de concentração de HTP após tratamento com os valores estabelecidos na lista Holandesa.

Tabela 2. Comparação da concentração de HTP com limites de referência estabelecidos na lista Holandesa.

Tipo de solo	Concentração em peso seco (mg. Kg^{-1})		
	Referência (R)	Alerta (A)	Intervenção (I)
1. 0% de argila e 0% de matéria orgânica	10	505	1000
2. 25% de argila e 10% de matéria orgânica	50	2525	5000
Tratamento	Concentração em peso seco (mg. Kg^{-1})	Classificação tipo de solo 1	Classificação tipo de solo 2
BAN	2909	**Acima do nível de intervenção**	**Acima do nível de alerta**
BI5CO	1.103	**Acima do nível de intervenção**	**Abaixo do nível de alerta**
BI10CO	501	**Abaixo do nível de alerta**	**Abaixo do nível de alerta**

É possível verificar que se considerar o tipo de solo 2, 25% de argila e 10% de matéria orgânica, os tratamentos com bioestimulação apresentam valores abaixo do nível de alerta. Por outro, caso seja o considerado o solo tipo 1, 0% de argila e 0% de matéria orgânica, apenas o tratamento com bioestimulação utilizando 10% de composto orgânico apresenta concentração abaixo do nível de alerta.

O tratamento utilizando apenas bioatenuação natural, apresentou concentração final acima do nível de intervenção do solo tipo 1 e acima do nível de alerta para o solo tipo 2. Estes resultados sugerem que apenas a bioatenuação natural, não foi suficiente para reduzir a concentração de HTP para níveis menores do que o de alerta mesmo após 180 dias de remediação, independentemente do tipo de solo presente na Lista Holandesa.

Na Figura 2 são apresentados os ajustes dos dados experimentais ao modelo matemático de cinética de primeira ordem e seus respectivos ajustes das taxas de decaimento de HTP de todas as biopilhas. As constantes de biodegradação (k) de cada biopilha são apresentadas nas equações da Figura 2.

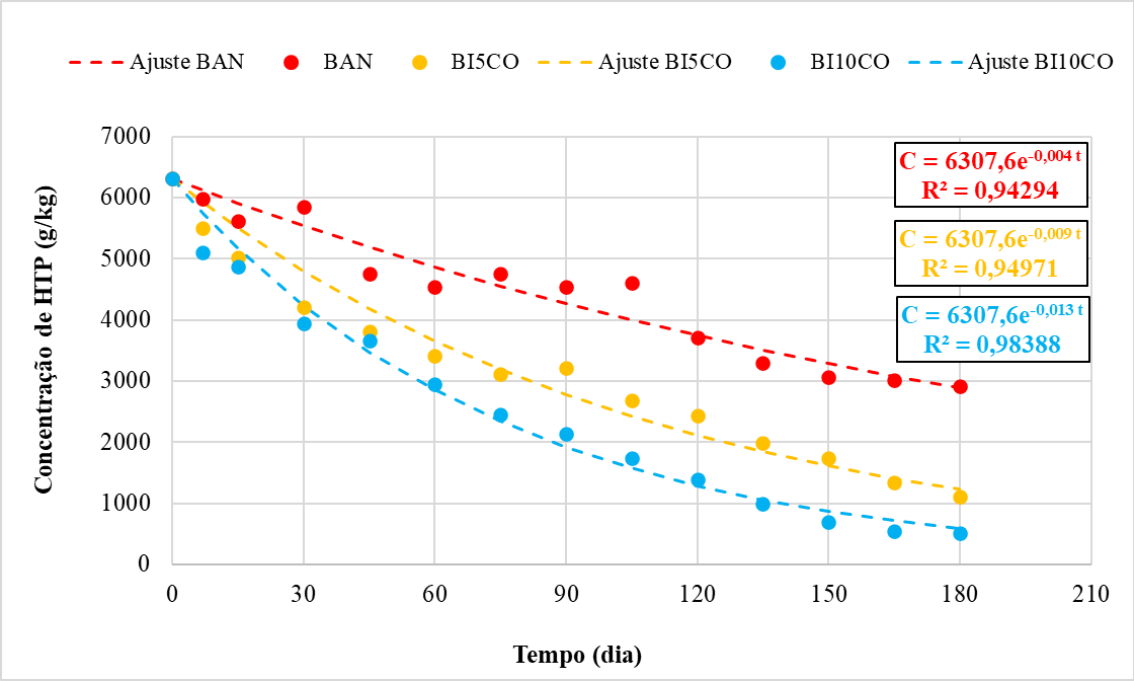


Figura 1. Ajuste da taxa de decaimento pelo modelo cinético de primeira ordem da biopilha com atenuação natural.

O cálculo da constante de biodegradação de acordo com o modelo de decaimento de primeira ordem dos experimentos possibilitou comparar a eficiência de cada biopilha. As constantes de biodegradação evidenciam que a velocidade de decaimento da concentração de HTP é diretamente proporcional com o teor de material estruturante utilizado na bioestimulação.

Outro aspecto que foi evidenciado se refere ao aumento de velocidade de decaimento da concentração de HTP de todas as biopilhas com utilização de material estruturante bioestimulante, em relação à biopilha sem material estruturante, onde aconteceu apenas a atenuação natural.

Isso sugere que houve bioestimulação da microbiota do solo contaminado pelos materiais estruturantes, aumentando não só em magnitude, como também em velocidade, a remoção de hidrocarbonetos totais oriundos do óleo diesel presente na matriz do solo. Comportamentos semelhantes foram relatados por Namkoong *et al.* (2002). De acordo com Guimarães (2018), altos teores de materiais estruturantes podem inibir a biodegradação e ocasionar a sorção do contaminante em sua matriz, reduzindo assim as constantes de decaimento de HTP. Portanto, nota-se que os teores utilizados nas biopilhas foram adequadas, tendo em vista que há uma relação diretamente proporcional entre as constantes de decaimento e o teor de material estruturante.

Na Tabela 4 é apresentado o monitoramento dos teores de carbono, nitrogênio e relação C/N das biopilhas realizados ao longo do experimento.

Os teores de carbonos aferidos representam a soma dos carbonos presentes na composição do solo natural, do óleo diesel e do material estruturante utilizado no bioestímulo das biopilhas. Nota-se pelo monitoramento realizado que em todos as biopilhas que há uma tendência de decaimento da quantidade de carbono. Essas reduções podem estar associadas à biodegradação dos HTP's.

As maiores quedas do teor de carbono são observadas nas biopilhas com a adição de materiais estruturantes em comparação a atenuação natural. O carbono orgânico é a principal fonte de energia para o

desenvolvimento dos microrganismos, portanto é um elemento necessário para realização e manutenção do processo. No entanto, para que haja sucesso na biorremediação, o óleo diesel deve ser a fonte principal de carbono do consumo energético microbiano. Conforme destacado por Namkoong *et al*. (2002), o material estruturante, quando rico em matéria orgânica, não deve ser a fonte de carbono preferencial microbiana, não pode haver a substituição da degradação dos contaminantes de interesse por qualquer outra fonte de carbono na biopilha. Nesse sentido, o composto orgânico, provavelmente não atuou como uma fonte energética, não sendo identificada competição do material estruturante com o óleo diesel, e o contaminante pode ter sido utilizado como fonte primária de energia.

Tabela 3. Teores de carbono, nitrogênio e relação C/N das biopilhas ao longo do experimento.

Experimento	Carbono (g/kg)			Nitrogênio (g/kg)			Relação C/N		
	BAN	BI5CO	BI10CO	BAN	BI5CO	BI10CO	BAN	BI5CO	BI10CO
T0	13,91	14,37	15,58	0,55	1,1	1,4	25,29	13,07	11,13
T7	13,75	14,09	15,43	0,55	1	1,4	25	14,09	11,02
T15	12,98	13,91	15,28	0,56	0,9	1,5	23,18	15,46	10,19
T30	12,74	13,74	15,18	0,59	0,8	1,6	21,59	17,18	9,49
T45	12,54	13,58	15,13	0,58	0,9	1,6	21,62	15,08	9,46
T60	12,37	13,57	15,13	0,58	1,1	1,5	21,33	12,34	10,09
T75	12,01	13,4	15,08	0,55	1,2	1,5	21,84	11,16	10,05
T90	11,24	13,22	14,98	0,56	1,2	1,5	20,07	11,02	9,99
T105	11,19	12,87	14,88	0,57	1,2	1,6	19,63	10,73	9,3
T120	11,9	12,73	14,83	0,58	1,3	1,7	20,52	9,79	8,72
T135	11,9	12,46	14,68	0,6	1,3	1,8	19,83	9,58	8,15
T150	11,7	12,08	14,63	0,6	1,3	1,9	19,5	9,29	7,7
T165	11,4	11,87	14,53	0,65	1,3	1,9	17,54	9,13	7,65
T180	10,72	11,45	14,38	0,65	1,3	1,9	16,49	8,81	7,57

Os teores de nitrogênio apresentaram pouca variação ao longo do tempo e uma leve tendência de crescimento. Isso sugere que houve disponibilidade de nitrogênio para os microrganismos, tendo em vista que ele é um importante nutriente para o desenvolvimento microbiano e por consequência é um elemento limitante do processo de biodegradação.

Os materiais estruturantes são os principais responsáveis pelo aporte de nitrogênio nas biopilhas de bioestimulação, pois não se verifica praticamente nenhuma alteração de nitrogênio no solo contaminado sem adição de material estruturante ao longo do experimento (bioatenuação natural). Isso evidencia que a inclusão dos materiais estruturantes regulou a manutenção e a disponibilização dos nutrientes aos microrganismos, gerando os melhores resultados de biodegradação do HTP.

No que se refere a relação C/N, de forma geral, observa-se uma tendência de redução da relação C/N até o final do experimento. Possivelmente, essas reduções estão associadas à redução do carbono e à maior disponibilidade do nitrogênio, sugerindo a ocorrência de biodegradação do óleo diesel em todas as biopilhas, sobretudo nas biopilhas com composto orgânico como elemento bioestimulante. Conforme relatado por Guimarães (2018), a fonte primária de carbono para o crescimento microbiano é o óleo, promovendo a redução de HTP ao longo do tempo. Seguindo este raciocínio, o composto orgânico utilizado nos tratamentos da presente pesquisa pode ter atuado como bioaumentadores e bioestimuladores, possibilitando crescimento dos microrganismos e promovendo uma fonte alternativa de nutrientes.

É importante destacar ainda que as maiores relações C/N, conforme observado na Tabela 6, são verificadas para o solo contaminado sem adição de material estruturante. Essa foi a biopilha que apresentou menor quantidade de HTP removido. A relação C/N está diretamente relacionada à decomposição e mineralização do carbono. Relações C/N elevadas sugerem taxas mais lentas de decomposição e menor mineralização, enquanto as relações C/N baixas sugerem taxas mais rápida de decomposição e alta mineralização. Em outras palavras, as relações C/N elevadas o resíduo permanece mais o tempo no solo e as relações C/N mais baixas há rápida conversão do resíduo em fonte de nutriente para os microrganismos do

solo, principalmente o nitrogênio orgânico. Portanto, as maiores relações C/N observadas para o solo contaminado sem adição de material estruturante corroboram com a menor constante de decaimento (k). Assim como as menores relações C/N observadas nas biopilhas com composto orgânico foram as que apresentaram maior remoção de HTP e constantes mais altas de biodegradação.

Os resultados das análises microbiológicas das biopilhas são apresentadas na Figura 2. Nota-se que houve um aumento das bactérias heterotróficas totais (BHT) (Figura 2a) e dos fungos totais (FT) (Figura 2b) com adição do material estruturante, em relação ao solo sem adição. Isso pode estar associado ao melhoramento das características do solo, promovido pela inclusão dos materiais estruturantes como, por exemplo, aumento da porosidade, aeração, umidade, disponibilidade de nutriente e matéria orgânica, textura, dentre outros. Conforme destacado por Morais (2005), esses efeitos são benéficos para a qualidade do solo e resultam no aumento de quantidade e atividade microbiana.

As BHT apresentaram inicialmente uma população de 1,5 x 10^8 UFC g^{-1} solo. Esses microrganismos foram o que apresentaram maior crescimento, sendo observado um pico em tempos diferentes para cada biopilha. Para o solo sem adição de materiais estruturantes, utilizando apenas a atenuação natural, o pico de quantidade de BHT ocorreu em 60 dias, com 1,09 x 10^9 UFC g^{-1} solo. Nesse mesmo período ocorrem as maiores remoções de HTP do solo. Para o solo com 5% e 10% de composto orgânico, os picos de quantidade de BHT ocorreram em 30 dias com, respectivamente, 1,47 x 10^{10} UFC g^{-1} e 4,09 x 10^{10} UFC g^{-1} solo. Esses resultados corroboram com as constantes de decaimento de HTP (k), onde se verifica uma constante de degradação mais alta para as biopilhas com composto orgânico.

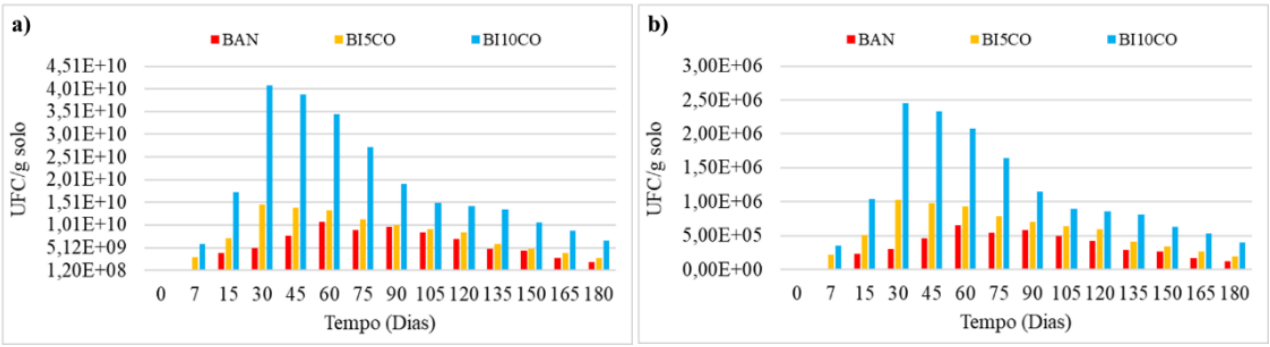


Figura 2. Quantificação de bactéricas heterotróficas totais (BHT) em a) e de fungos totais em b) das biopilhas ao longo do experimento.

O decrescimento observado nas biopilhas após os picos podem estar associados à redução dos substratos proveniente do material estruturante e do próprio óleo diesel. Esses resultados corroboram com Santos (2007), que encontrou BHT da ordem de 10^8 a 10^{10} UFC g^{-1} solo, utilizando adições de 5% e 10% de pó da casca do coco na biorremediação de um solo contaminado por petróleo. A autora relaciona os resultados à maior aeração que o material estruturante imprime ao solo, obtendo um pico de BHT após 20 dias de experimentos.

No que se refere às populações de FT, observam-se quantidade menores do que as BHT. No entanto, verifica-se um padrão de crescimento similar aos observados nas BHT em relação à utilização do material estruturante. Apesar da menor quantidade de FT, os fungos são de suma importância na biodegradação, pois atuam em conjunto com as bactérias. Os fungos por apresentarem crescimento micelial colonizam os substratos e promovem a sua digestão o que facilita a ação posterior das bactérias (Morais, 2007). Para Santos (2007), os fungos apresentaram maior eficiência do que as bactérias, em condições adversas, como limitação de nutrientes, pH extremos, redução de umidade, temperaturas extremas, dentre outras.

Para o solo sem material estruturante, os FT foram de 1,04 x 10^4 UFC g^{-1} solo até um pico de 6,49 x 10^4 UFC g^{-1} solo, ocorrendo nos primeiros 60 dias de ensaio. Para os solos com 5% e 10% de composto orgânico, os valores de pico foram, respectivamente, de 1,03 x 10^6 UFC g^{-1} solo e de 2,45 x 10^6 UFC g^{-1} solo, ocorrendo nos primeiros 30 dias. Esses resultados corroboram com Shahsavari *et al*. (2013), que avaliaram diferentes materiais estruturantes oriundos de resíduos vegetais e observaram que a maior população de FT obtida foi da ordem de 10^6 UFC g^{-1} solo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição do composto orgânico agregou propriedades às biopilhas, promovendo um ambiente favorável à biodegradação do óleo diesel presente na matriz do solo areno-argiloso. A técnica utilizada mostrou-se viável, tendo em vista que houve remoções de hidrocarbonetos totais da ordem de 92%, aproximadamente, com 180 dias de tratamento ao ser utilizado 10% de composto orgânico.

O monitoramento revelou que o material estruturante, além de melhorar as propriedades físicas das biopilhas, disponibilizou nutrientes para os microrganismos que potencializou significativamente a atividade metabólica da microbiota local, refletida no aumento das Unidades Formadoras de Colônias (UFC).

A potencialização da atividade metabólica da microbiota local refletiu não somente em uma maior quantidade de microrganismo, como também em maior velocidade de crescimento, em comparação à bioatenuação natural do solo contaminado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, J. de A., Augusto, F., & Jardim, I. C. S. F. (2010). Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*, v. 35, n. 3, p. 17-43.

Guimarães, C. C.(2018). *Estudo da utilização de composto orgânico para a remediação de solo contaminado por hidrocarboneto*. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Hagsheno, H., & Arabani, M. (2022). Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-32.

Mendonça, R., & Matos, A. T. (2005). *Manual de laboratório: resíduos sólidos e efluentes*. Editora UFV.

Mendoza, C. E. H., Ramírez, P. G., & Alegría, O. C. (2021). Geotechnical Evaluation of Diesel Contaminated Clayey Soil. *Applied Sciences*, v. 11, n. 14, p. 6451.

Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2019). Geotechnical properties of hydrocarbon contaminated soils: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, n. 5, p. 3685-3717.

Santos, M. C. (2005). *Tratamento de solos contaminados com óleo diesel por meio de biopilhas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP.

Sathyapriya, S., Sharvesh, R., & Natarajan, C. (2023). Bioremediation of oil contaminated sand. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 3.

Saviozzi, A., Cardelli, R., & Cozzolino, M. (2009). Bioremediation with compost of a diesel contaminated soil: monitoring by dehydrogenase activity and basal respiration. *Compost Science and Utilization*, v. 17, n. 1, p. 55-60.

Schwarz, L. G., & Krizek, R. J. (2006). Hydrocarbon residuals and containment in microfine cement grouted sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 2, p. 214-228.

Trindade, P. V. O. (2002). *Biorremediação de solo contaminado com hidrocarbonetos de petróleo*. Tese de Doutorado, UENF, Campos dos Goytacazes.

Wiedemeier, T. H. *et al*. (2007). *Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water*. Air Force Center for Environmental Excellence.