

Bioestimulação como forma de recuperação de áreas contaminadas por hidrocarboneto no semiárido nordestino

A recuperação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo surgiu em virtude do grande impacto ambiental decorrente de acidentes envolvendo derrames, na extração, transporte em dutos, embarcações e unidades industriais. A biorremediação é considerada um método sustentável e economicamente viável para reduzir ou remediar as contaminações no ambiente provocado. Dentre as técnicas desenvolvidas, a bioestimulação é uma opção de acelerar a microbiota nativa do solo com a adição de nutrientes. O experimento foi conduzido em solo arenoso contaminado por petróleo e bioestimulado com fertilizantes. O objetivo deste trabalho foi avaliar a bioestimulação com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) na degradação dos hidrocarbonetos. Para tal, o experimento foi conduzido por um período de 105 dias avaliando a produção de CO₂ pelo método respirométrico. Os tratamentos foram organizados em bloco casualizado, em função de cinco doses de petróleo (0, 1, 3, 5 e 10%) e cinco de (NPK) equivalentes a 0, 250, 500, 1250 e 2500 kg ha⁻¹ da formulação 10-30-20, com três repetições. Verificou-se que a maior produção de C-CO₂ foi de 3.539,40 mg kg⁻¹ para as doses de 9,20% de petróleo e 2.435 kg ha⁻¹ para o NPK.

Palavras-chave: Biorremediação; Fertilização; Hidrocarbonetos.

Biostimulation as a way of recovering areas contaminated by hydrocarbon in the semi-arid northeast

The recovery of areas contaminated by petroleum hydrocarbons arose due to the great environmental impact resulting from accidents involving leakage during extraction, transport in pipelines, vessels and industrial units. Bioremediation is considered to be a sustainable and economically viable method for reducing or remedying contamination in the provoked environment. Among the developed techniques, biostimulation is an option to accelerate the native soil microbiota with the addition of nutrients. The experiment was conducted in sandy soil contaminated with petroleum and biostimulated with fertilizers. The objective of this work was to evaluate the biostimulation with nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) in the degradation of hydrocarbons. Thus, the experiment was conducted for a period of 105 days evaluating the CO₂ production by the respirometry method. The treatments were arranged in a randomized block, according to five petroleum doses (0, 1, 3, 5 and 10%) and five (NPK) doses equivalent to 0, 250, 500, 1250 and 2500 kg ha⁻¹ of the 10-30-20 formulation, with three replicates. It was verified that the highest C-CO₂ production was 3.539.40 mg kg⁻¹ for the doses of 9.20% of petroleum, and 2,435 kg ha⁻¹ for NPK.


Keywords: Bioremediation; Fertilization; Hydrocarbons.


Topic: Engenharia Ambiental


Received: 06/06/2022


Approved: 18/08/2022


Reviewed anonymously in the process of blind peer.


Ana Beatriz Alves de Araújo 
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3258937728496364>
<http://orcid.org/0000-0003-0477-0021>
beatrizufersa@gmail.com


Ana Katarina Oliveira Aragão 
Instituto de Defesa do Meio Ambiente em Natal, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9362078286503928>
<http://orcid.org/0000-0001-7567-8551>
katneg@gmail.com

Khadija Jobim 
Instituto de Defesa do Meio Ambiente em Natal, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4623885354822378>
<http://orcid.org/0000-0002-3954-3841>
khadijajobi@gmail.com

Antônio Diego da Silva Teixeira 
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7602339705056052>
<http://orcid.org/0000-0003-4506-8618>
diego.ita@hotmail.com

Ana Luiza Veras de Souza 
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3438141481768017>
<http://orcid.org/0000-0002-1977-7907>
ana_luizavera@hotmail.com

Priscila Pascali da Costa Bandeira 
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7920904010363268>
<http://orcid.org/0000-0003-0966-7488>
priscilabandeira@outlook.com

Poliana Maria da Costa Bandeira 
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7229543787567127>
<http://orcid.org/0000-0002-7183-5705>
polianabandeira1@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2318-2881.2022.003.0006

Referencing this:

ARAÚJO, A. B. A.; ARAGÃO, A. K. O.; JOBIM, K.; TEIXEIRA, A. D. S.; SOUZA, A. L. V.; BANDEIRA, P. P. C.; BANDEIRA, P. M. C. Bioestimulação como forma de recuperação de áreas contaminadas por hidrocarboneto no semiárido nordestino. **Nature and Conservation**, v.15, n.3, p.71-81, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2022.003.0006>

INTRODUÇÃO

O mundo atual está cada vez mais dependente do petróleo e de seus derivados para a manutenção da atividade industrial, entretanto as atividades de extração, transporte e refinamento de petróleo têm contribuído para a contaminação de solos e rios em todo o planeta (LOPES et al., 2010), sendo os compostos orgânicos que exigem maior preocupação ambiental, dentre eles os HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos) e TPHs (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo), que normalmente são os principais a serem identificados e quantificados antes e durante um processo de biorremediação.

A técnica de biorremediação consiste na utilização de microrganismos com o objetivo de degradar compostos tóxicos transformando-os em produtos neutros que não irão agredir o meio ambiente Speight et al. (2018), vêm sendo amplamente estudadas e utilizadas para remediação de ambientes contaminados com substâncias orgânicas e têm como pré-requisito básico o aumento da eficiência da remoção natural feita pelos microrganismos, Francis et al. (2015). As técnicas de biorremediação podem ser executadas tanto *ex situ* como *in situ*. Nos processos *ex situ* o meio é extraído e tratado em instalação de depuração específica. Já nos processos *in situ*, a biorremediação é feita no próprio local de contaminação, Pereira et al. (2012). Portanto, as técnicas de biorremediação *in situ* são mais viáveis pela facilidade de sua aplicação em relação às técnicas *ex situ*, além de gerar menos custos com o transporte e armazenamento do material contaminado e menos distúrbios ambientais (CORIOLANO et al., 2016). Nesse contexto, esse trabalho objetivou avaliar a biodegradação de petróleo bioestimulada com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK).

REVISÃO TEÓRICA

Composição química do petróleo

O petróleo é uma mistura líquida complexa constituída por um vasto número de compostos de hidrocarbonetos, que consistem principalmente de carbono e hidrogênio em proporções diferentes, a composição do petróleo, em base elementar, incide dentro de certos limites, independentes da sua origem (FAHIM et al., 2012).

O petróleo é um líquido escuro acastanhado, de consistência oleosa, de cheiro forte e coloração que pode variar do preto ao castanho, originando-se da decomposição de animais e vegetais marinhos soterrados em desabamentos da crosta terrestre em épocas remotas. Alguns podem ser escuros, densos e viscosos, com pouco gás, enquanto outros podem apresentar tonalidades mais claras, baixa densidade e viscosidade, com quantidade expressiva de gás, em função dos diferentes reservatórios em que os óleos são obtidos (PEDROTI, 2007).

Na norma técnica Standard Terminology Relating to Petroleum Products, and Lubricants – D 4175 09, a American Society for Testing and Materials (ASTM), apresenta a seguinte definição para o petróleo: ‘Uma mistura de hidrocarbonetos de ocorrência natural, geralmente em estado líquido, que também pode incluir compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio, metais e outros elementos’.

As principais características do petróleo são, conforme Martins (2004) a densidade do óleo, o tipo de

hidrocarboneto, ou base, predominante na mistura e o teor de enxofre. De acordo com o autor, em relação à densidade, os diferentes tipos de petróleo são classificados segundo uma gradação que vai de leves (menos densos) a pesados (mais densos). De acordo com as normas do American Petroleum Institute (API), essa classificação é conhecida também como “grau API”. Segundo essa classificação, quanto menor a densidade do petróleo, maior o grau API e conseqüentemente maior o valor comercial do petróleo, tendo em vista que será possível produzir uma parcela maior de derivados nobres, de elevado valor comerciais, como a gasolina, o diesel e o gás liquefeito de petróleo (GLP), relativamente a outro tipo de óleo, mais pesado (menor grau API). O grau API é maior quando se diz que o petróleo é mais leve. Petróleos com grau API maior que 32° são considerados leves; entre 24° e 31° API, são considerados médios e abaixo de 23° API, são considerados pesados; e com grau API igual ou inferior a 10° são considerados petróleos extrapesados. O óleo leve (alto grau API) é constituído predominantemente de hidrocarbonetos alifáticos mais facilmente degradados pela população microbiana do que o óleo mais pesado, que pode conter maior abundância de hidrocarbonetos aromáticos (PETERS et al., 1993).

Os hidrocarbonetos que possuem dois ou mais anéis são denominados policíclicos aromáticos (HPA), estes são considerados os mais tóxicos componentes do petróleo e estão associados a efeitos carcinogênicos. Muitos dos HPAs de baixo peso molecular são solúveis em água, aumentando o risco de contaminação, e são os poluentes que mais preocupam tratando-se de poluição ambiental. O benzo (a) pireno, o mais extensivamente HPA estudado, têm sido demonstrados que produz metabólitos cancerígenos quando agem nas enzimas do corpo. Outra preocupação crescente é a contaminação do solo por HPA, que segue para águas subterrâneas, cuja contaminação é associada a uma grande gama e locais contaminados por substâncias perigosas (HAIMAM, 1995).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, ainda são produzidos hoje por processos industriais da refinação de petróleo, produção de coque e estação de tratamento de esgotos na indústria petrolífera (CUTRIGHT et al., 1994). A estrutura dos HPAs tem efeito significativo sobre a biodegradação, uma vez que compostos com menores números de anéis aromáticos, como antraceno, fenantreno e pireno, são mais rapidamente degradados do que criseno, pirileno e 1,2 benzantraceno, que possuem maior número de anéis (ALAN et al., 1993; ALEXANDER, 1994; LIEBEG et al., 1999).

Solo

O solo é qualquer material mineral ou orgânico inconsolidado, de origem natural ou artificial, com potencial para o desenvolvimento de plantas (HOLLIS, 1991). Essa camada superficial da crosta terrestre é constituída por três fases: sólida, líquida e gasosa, que são intimamente combinadas. Segundo Rocha et al. (2004), em geral, a fase sólida, que é constituída de formações minerais e de fração orgânica, ocupa em média 50 % do volume total do solo, sendo que 45% são representados por minerais e 4% por matéria orgânica. O restante do volume do solo é ocupado por fases líquida e gasosa, representando, cada uma, 25% do volume total do solo.

As partículas sólidas minerais do solo são divididas basicamente em três frações texturais que são:

argila, silte e areia (PREVEDELLO, 1996). A classificação do solo é uma proporção relativa de diferentes tamanhos de partículas.

Essas fases formam a estrutura do solo em camadas denominadas horizontes, sujeitas a constantes transformações antrópicas, através de processos de adição, remoção, translocação de natureza química, física e biológica. Sendo o resultado da interação da ação da atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera (MENDONÇA, 2010).

O conjunto de horizontes (um corte vertical desde a superfície até o material semelhante ao que deu origem ao solo) chama-se o perfil do solo. As transformações e remoções, ocasionadas pelo intemperismo, ocorrem com maior intensidade na parte superior deste perfil. A Natural Resources Conservation Service (NRCS Soils), orienta que perfil de um solo completo e bem desenvolvido possui basicamente quatro tipos de horizontes, que costumavam ser chamados de 'horizontes principais' e são convencionalmente identificados pelas letras maiúsculas O, A, E, B, C e R.

Trindade (2002), observou uma grande dificuldade na recuperação de solos impactados por petróleo e/ou seus derivados quando estes apresentam características argilosas. Solos com uma baixa permeabilidade, por exemplo, são difíceis de aerar, e frequentemente formam aglomerados, tornando difícil a distribuição de umidade, ar, adição de nutrientes e de microrganismos. Assim, materiais de baixa densidade, ou agentes estruturantes, são adicionados ao solo para reduzir a sua densidade, aumentar a porosidade e a possibilidade de aumentar a difusão de oxigênio.

Os tratamentos físicos envolvem a separação das fases do solo e contaminante, é utilizada na remediação de solos não saturados contaminados com compostos orgânicos voláteis e semivoláteis. Os tratamentos químicos se baseiam nas diferenças das propriedades químicas dos diversos componentes dos contaminantes e envolvem, geralmente, uma ou mais das reações químicas de neutralização, fotólise e/ou oxi-redução (MARIANO, 2005). O tratamento biológico, ao contrário dos processos físicos e químicos, é considerado um método seguro, eficiente e de menor custo a ser aplicado na remediação de solos contaminados por compostos orgânicos (TRINDADE, 2002; D'ANNIBALE et al., 2006).

Biorremediação

A técnica de biorremediação consiste na utilização de microrganismos com o objetivo de degradar compostos tóxicos transformando-os em produtos neutros que não irão agredir o meio ambiente (MESQUISTA, 2004). Vêm sendo amplamente estudadas e utilizadas para remediação de ambientes contaminados com substâncias orgânicas e têm como pré-requisito básico o aumento da eficiência da remoção natural feita pelos microrganismos (SPINELLI, 2007). O emprego da biorremediação na recuperação de ambientes contaminados iniciou-se em 1988, quando cientistas utilizaram microrganismos para tratar o solo contra poluentes e lixos tóxicos (TORTORA, 2005). As técnicas de biorremediação podem ser executadas tanto *ex situ* como *in situ*. Nos processos *ex situ* o meio é extraído e tratado em instalação de depuração específica. Já nos processos *in situ*, a biorremediação é feita no próprio local de contaminação (SEABRA, 2001). Portanto, as técnicas de biorremediação *in situ* são mais viáveis pela facilidade de sua aplicação em

relação às técnicas *ex situ*, além de gerar menos custos com o transporte e armazenamento do material contaminado e menos distúrbios ambientais (MARIANO, 2006).

O princípio básico desta tecnologia baseia-se no potencial apresentado pelos microrganismos, para degradar, modificar ou remediar substâncias tóxicas. Hidrocarbonetos aromáticos derivados do petróleo, presentes na natureza ou incorporados como compostos xenobióticos, podem ser degradados pelos microrganismos através de rotas catabólicas específicas (CUNHA et al., 2008).

Muitos ambientes contaminados por hidrocarbonetos são anóxicos, como os aquíferos, sedimentos aquáticos e solos submersos. Em tais condições, a biodegradação é realizada por microrganismos anaeróbicos estritos ou facultativos, utilizando aceptores de elétrons como o nitrato (desnitrificantes), sulfato redutores, redutores de Fe³⁺, CO₂ (organismos metanogênicos), ou outros aceptores (Mn, Cr, U, etc.) (CHAKRABORTY et al., 2004; FOGHT, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido durante 6 meses, sendo os tratamentos distribuídos em blocos casualizado, esquema fatorial 5x5, sendo cinco doses de petróleo e cinco de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), com três repetições. O solo e o petróleo utilizados foram coletados na região do campo de Canto do Amaro, com área de desenvolvimento de 362,79km², que está localizado na porção emersa da Bacia Potiguar, a cerca de 260 km da cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), (Figura 1).

O solo foi coletado do topo até uma profundidade 15 cm, acondicionadas em sacos de plásticos e levadas ao Laboratório de solos, do Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Posteriormente o solo seco ao ar foi homogeneizado e peneirado em peneira com malha de 2 mm de diâmetro, o solo peneirado foi retirado amostras para caracterização física e química.

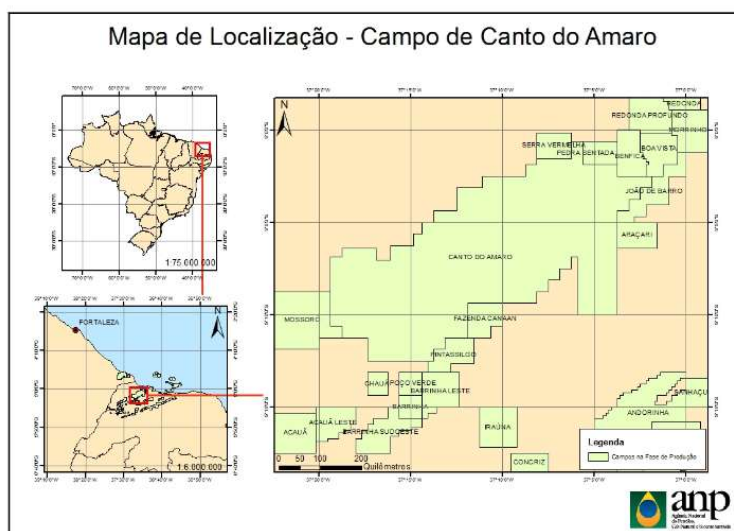


Figura 1: Localização do campo Canto do Amaro. Fonte: ANP (2018).

Para o experimento pesou-se 2.000 g de solo para cada dose de petróleo 0, 20, 60, 100 e 200 g, que correspondem 0, 1, 3, 5 e 10 % (p/p). Com o solo contaminado pesou-se 100 g, acondicionou em potes de vidro com tampa de rosca, hermeticamente fechados e com capacidade de 0,6 dm³ cada. As doses de

fertilizantes (NPK) foram equivalentes a 0, 250, 500, 1.250 e 2.500 kg ha⁻¹, da formulação 10-30-20. Para isto, preparou-se uma solução concentrada de NPK, tendo como fonte de nitrogênio, fósforo e potássio: ureia, monofosfato de amônio (MAP) e cloreto de potássio (KCL), respectivamente. Em seguida efetuaram-se as diluições com as respectivas concentrações, e desta solução adicionaram-se 10 mL em todos os tratamentos. Para elevar o pH entre 6,5 a 7,0 adicionou-se 3,5 mL da solução hidróxido de sódio (NaOH) 0,25 mol L⁻¹ e homogeneizou. Em cada um dos 25 tratamentos foi adicionada 20 mL de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹, para captura do dióxido de carbono (CO₂), utilizando um copo de polietileno de 50 mL para armazenar a solução. As parcelas foram incubadas em temperatura ambiente e acompanhados diariamente, tendo a temperatura variada entre 31,9 e 34,3 °C.

A determinação do CO₂ foi realizada semanalmente e em cada frasco, na solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹ era adicionado 1 mL de cloreto de bário (BaCl₂) 1 mol L⁻¹, em seguida titulada com ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol L⁻¹, utilizando fenolftaleína como indicador. Antes do fechamento dos frascos, o solo era mecanicamente revirado para promover sua aeração. Sendo a produção de carbono mineralizável (C-CO₂) expressa em mg kg⁻¹ de solo seco, quantificada através da fórmula de Stotzky (1965). Para a análise dos resultados foram determinadas as interações e influências significativas de cada variável, utilizando os dados obtidos para a confecção de uma superfície de resposta para a visualização de seus efeitos por meio das curvaturas e isolinhas de contorno obtidas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na ausência do petróleo, a produção de C-CO₂ variou de 353 a 526 mg kg⁻¹ (Figura 1A). Com a adição das doses de petróleo, esses valores variaram de 1.014 a 1.221 mg kg⁻¹; 1.689 a 2.059 mg kg⁻¹; 1.836 a 2.792 mg kg⁻¹ e 1.377 a 3.525 mg kg⁻¹ para as doses crescentes de petróleo 1, 3, 5 e 10 %, respectivamente, (Figuras 2 B, C, D e), com maior produção de C-CO₂ de 3.539,40 mg kg⁻¹ (Figura 1E), esse aumento, deve-se aos microrganismos utilizaram o petróleo como fonte de carbono, aumentando população microbiana e consequentemente liberando mais C-CO₂. De acordo com Duan et al. (2015), com a evolução de C-CO₂ e uma maior degradação dos compostos orgânicos acontecem maior produção de microrganismos.

Esta maior produção de C-CO₂ também foi observada por Falås et. al. (2018), onde a densidade populacional e a produção de C-CO₂ teve relação direta para estimular o metabolismo e o crescimento de microrganismos residentes, que se localizavam em condições abióticas próprias.

Pelo ajuste do modelo da superfície de resposta, obteve-se o coeficiente de determinação (R²) igual a 0,9445, verificando que tanto para o NPK quanto para o petróleo, o efeito foi quadrático na produção de C-CO₂, consequentemente maior degradação de petróleo (Figura 3) até o ponto de máximo. A maior produção de C-CO₂ foi obtida para combinação de 2.435 kg ha⁻¹ de NPK_{max} e 9,20 % de Petróleo_{max}, para uma produção máxima de 3.539,40 mg kg⁻¹ de C-CO₂ (Figura 2). Komilis et al. (2010) estudaram as condições ideais para a degradação do diesel via medição indireta da produção de C-CO₂, o qual resultou na maior produção de C-CO₂, e consequentemente maior degradação do contaminante, assim a concentração de N ideal ficaria na faixa de aproximadamente 1400 mg kg⁻¹ de N de solo seco, estimada na concentração inicial de 2 % de

diesel utilizada no estudo.

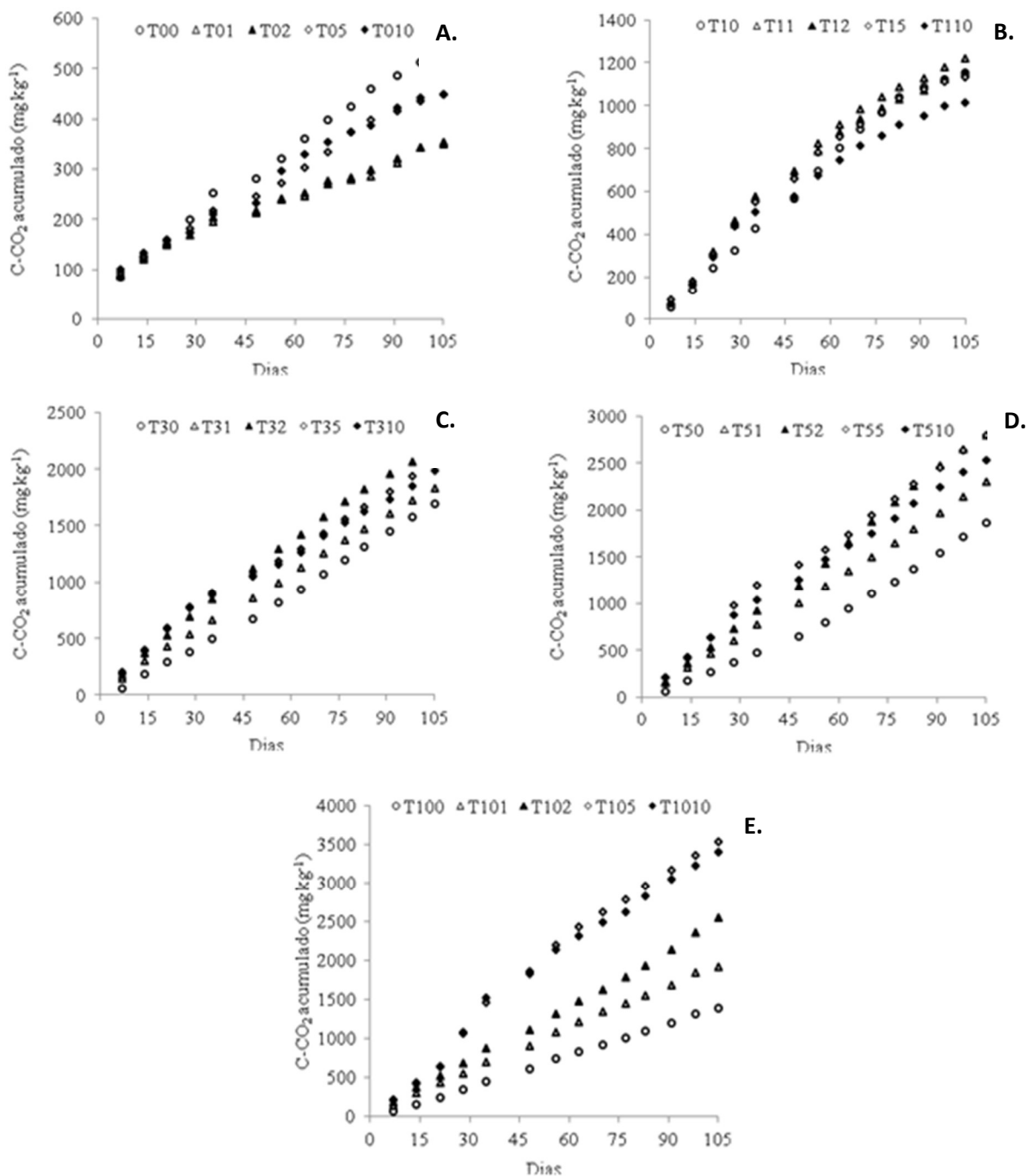


Figura 2: Produção acumulada de C-CO₂ em função dos dias com doses crescentes de petróleo e NPK.

Levando em consideração que existem várias combinações de NPK e petróleo entre os tratamentos, observou-se uma região racional de 1067,5 kg ha⁻¹ de NPK e 6,68 % para petróleo, como observado nas isoquantas (Figura 4).

Descontando a produção de C-CO₂ do tratamento na ausência de NPK e petróleo, a produção de C-CO₂ em função das doses de petróleo (Figura 4) foi quadrática com ponto de máximo. Observou-se um aumento na produção de C-CO₂ com aumento das doses de petróleo em todos os tratamentos, porém, com decréscimo na taxa de C-CO₂ a partir do ponto máximo (Figura 5), provavelmente devido à toxidez causada pelo excesso de petróleo. No entanto, solos com alta carga de contaminação apresentam excesso de

carbono, que tende a desequilibrar a sua razão, tornando-se tóxico para os microrganismos (RUBERTO et al., 2009; KAUPPI et al., 2011).

$$CO = 408,9797 + 525,3638 \cdot x + 146,487 \cdot y - 39,3401 \cdot x^2 + 20,3976 \cdot x \cdot y - 17,1581 \cdot y^2$$

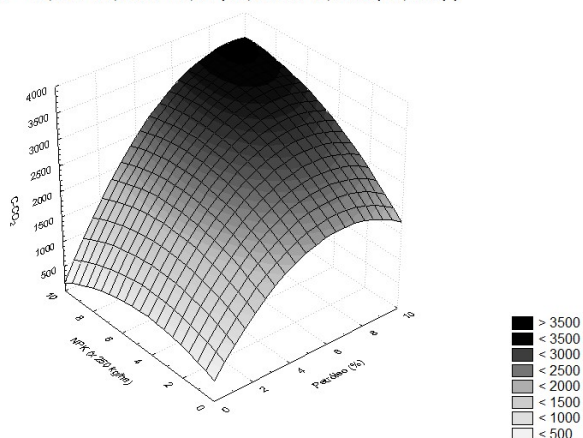


Figura 3: Produção acumulada de C-CO₂ com doses crescentes de petróleo e NPK.

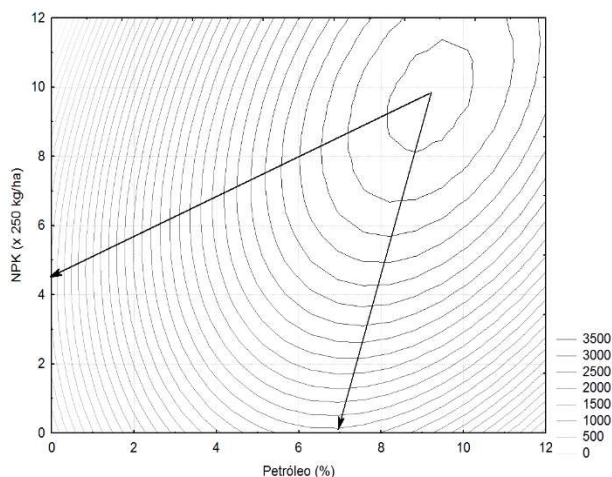


Figura 4: Isoquantas das concentrações acumuladas de C-CO₂ em função das doses petróleo e NPK.

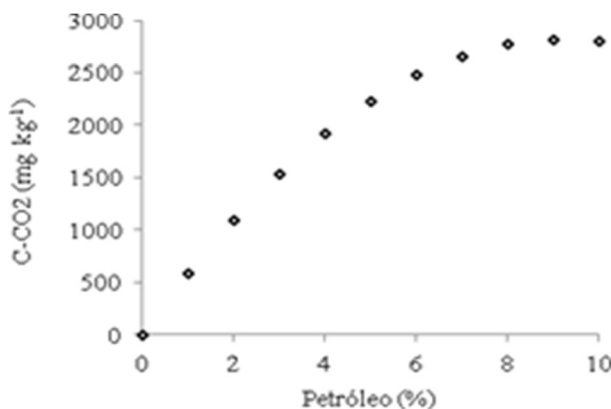


Figura 5: Concentrações acumuladas de C-CO₂ em função das doses petróleo.

Para a produção de C-CO₂ em função das doses de NPK (Figura 6), verificou-se máxima eficiência física de 1.372,97 kg ha⁻¹. Considerando a máxima eficiência econômica de 90 %, obteve-se os valores de 2.825,92 mg kg⁻¹ de C-CO₂ e 938,95 kg ha⁻¹ para o NPK, respectivamente. A economia foi estimada pela subtração entre C-CO₂ e NPK em 434 kg ha⁻¹ de NPK, correspondente a uma economia de 32 % de fertilizante. Segundo Quideau (2012), o aumento da população microbiana está intimamente relacionado com a fertilização de solos de poucos nutrientes, como também os microrganismos são influenciados pelo tratamento de fertilização com NPK, o que aumentou a população microbiana em até 85 %, ocorrendo uma interação significativa entre o tipo de solo e adubação.

Esse comportamento está relacionado à adição de fertilizantes que possuem em sua composição os macronutrientes: nitrogênio, fósforo e potássio (N, P, K) (RIZZO et al., 2006), pois se tem a finalidade de estabelecer relações ótimas de N:P:K (10:30:20) para o aumento das populações microbianas e, conseqüentemente, aumento significativo das taxas de degradação do contaminante orgânico (TRINDADE et al., 2005).

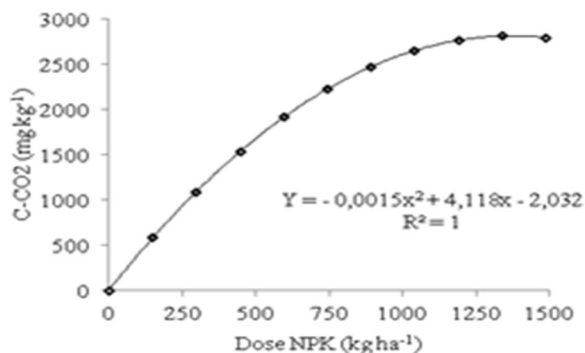


Figura 6: Concentrações acumuladas de C-CO₂ em função das doses NPK.

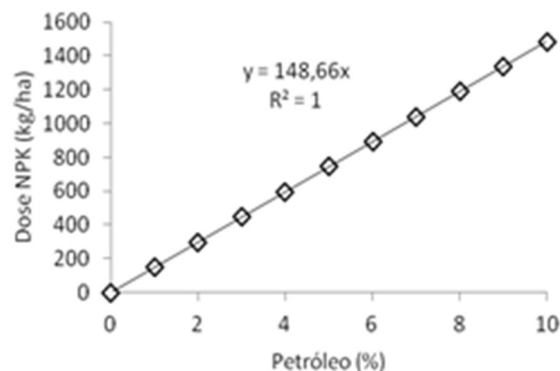


Figura 7: Doses de NPK em função das doses petróleo.

Analisando as doses de NPK em função das doses de petróleo (Figura 7), verificou-se relação linear, com intercepto e coeficiente angular, iguais a zero e 148,66, respectivamente. Apesar da relação linear crescente entre a quantidade de NPK e a concentração de petróleo no solo, Quideau et al. (2012) recomendaram a aplicação de 250 kg ha⁻¹ da formulação 10-30-20, porém esta dose seria para a concentração de petróleo de aproximadamente 1,68 %. Millioli (2009) investigou a bioestimulação das fontes de nitrogênio, fósforo e potássio sobre os contaminantes, observando a facilidade com que os microrganismos os assimilam e quando em concentrações apropriado vão instigar a biodegradação dos contaminantes.

CONCLUSÕES

A técnica de bioestimulação com NPK teve efeito significativo sobre a produção de C-CO₂ em função das doses de petróleo. A maior produção de C-CO₂ foi de 3539,40 mg kg⁻¹ obtida para as doses de 2.435 kg ha⁻¹ de NPK e 9,20 % de petróleo. Na faixa racional a dose máxima foi de 1067,50 kg ha⁻¹ de NPK e 6,68 % de petróleo para uma produção de 3057,20 mg kg⁻¹ de C-CO₂.

REFERÊNCIAS

ALAN, A. A.; FERREK, J. R.. Advantage and disadvantages of burning oil In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE.

Annals. Washington: API, 1993. p.765-772. DOI:

<http://doi.org/10.7901/2169-3358-1993-1-765>

ALEXANDER, M.. **Biodegradation and Bioremediation.** Academic press, Inc., 1994.

COROLANO, A. C. F.; MORAIS FILHO, M. C.. **Biorremediação, uma alternativa na utilização em áreas degradadas pela indústria petrolífera.** **Holos**, Natal, v.7, p.133-150, 2016. DOI: <http://doi.org/10.15628/holos.2016.4278>

CUNHA, C. D.. **Biorremediação de água subterrânea contaminada com gasolina e análise molecular da comunidade bacteriana presente.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT - Série Tecnologia Ambiental, 2008.

CUTRIGHT, T. J.; LEE, S.. **In Situ Soil Remediation: Bacteria or Fungi.** Akron: Department of Chemical Engineering, University of Akron, 1994. DOI:

<http://doi.org/10.1080/00908319508946090>

SPINELLI, A. C. O. C.. **Biorremediação de solo argiloso contaminado por hidrocarbonetos provenientes de derrame de óleo diesel.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

CHAKRABORTY, R.; COATES, J. D.. Anaerobic degradation of mono aromatic hydro carbons. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.64, p.437-446, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00253-003-1526-x>

D'ANNIBALE, A.; ROSETTO, F.; LEONARDI, V.; FEDERICI, F.; PETRUCCIOLI, M.. Role of Auto chthonous Filamentous Fungi in Bioremediation of a Soil Historically Contaminated with Aromatic Hydrocarbons. **Applied and Environmental Microbiology**, v.72, n.1, p.28-36, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1128/AEM.72.1.28-36.2006>

DUAN, M.; CHANG, S.. Responses of lodgepole pine (*Pinus contorta*) and white spruce (*Picea glauca*) to fertilization in

some reconstructed boreal forest soils in the oil sands region. **Ecological Engineering**, v.84, p.354-361, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.046>

FALÃS, P.; JEWELL, K.; HERMES, N.; WICK, A.; TERNES, T.; JOSS, A.; NIELSEN, J.. Transformation, CO₂ formation and uptake of four organic micropollutants by carrier-attached microorganisms. **Water Research**, v.141, p.405-416, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.040>

FAHIM, M.; AL-SAHAF; TAHER, A.; ELKILANI, S. G.; LEIRAS, A. C.. **Introdução ao Refino de petróleo**. 2011.

FRANCIS, A. J.; NANCHARAI, Y. V.. In situ and ex situ bioremediation of radionuclide-contaminated soils at nuclear and norm sites. **Environmental Remediation and Restoration of Contaminated Nuclear and Norm Sites**, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-1-78242-231-0.00009-0>

FOGHT, J.. Anaerobic Biodegradation of Aromatic Hydrocarbons: **Pathways and Prospects Journal of Molecular and Microbiology and Biotechnology**, v.15, p.93-120, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1159/000121324>

HAIMANN, R. A.. Fungal Technologies for the treatment of hazardous waste. **Environmental Progress, Santa Ana, Sacramento**, v.14, n.3, p.201-203, 1995. DOI: <http://doi.org/10.1002/ep.670140320>

HOLLIS, J. M.. The classification of soils in urban areas. In: BULLOCK, P.; GREGORY, P. J.. **Soils in the Urban Environment**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. p.5-27. DOI: <http://doi.org/10.1002/9781444310603.ch2>

LIEBEG, E. W.; CUTRIGHT, T. J.. The investigation of enhanced bioremediation through the addition of macro and micro nutrients in a PAHs contaminated soil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v.44, p.55-64, 1999.

KAUPPI, S.; SINKKONEN, A.; ROMANTSCHUK, M.. Enhancing bioremediation of diesel- fuel-contaminated soil in a boreal climate: comparison of biostimulation and bioaugmentation. **Int Biodeterior Biodegrad**, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.10.011>

KOMILIS, D.; VROHIDOU, A.; VOUDRIAS, E.. Kinetics of aerobic bioremediation of a diesel contaminated Sandy soil effect of nitrogen addition. **Water, Air, & Soil Pollution**, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11270-009-0159-9>

LOPES, A.; PIEDADE, M. T. F.. The period of contamination with petroleum influences the regrowth of *Echinochloa polystachya* (HBK) Hitchcock in varzea soil in Central Amazon? **Biota Neotropical**, v.10, n.4, p.143-148, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1676-06032010000400019>

MARTINS, B. A. D.. **Avaliação da cinética de biodegradação do etanol em concentrações mínimas necessárias dos nutrientes nitrogênio e fósforo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MARIANO, J. B.. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. Rio de Janeiro. Editora: Inter ciência. 2005.

MARIANO, A. P.. **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo**

diesel, Rio Claro. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006.

MENDONÇA, J. F. B.. **Solo: substrato da vida**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010.

MILLIOLI, V.; SERVULO, E.; SOBRAL, L.; CARVALHO, D.. **Bioremediation of crude oil-bearing soil: evaluating the effect of Rhamnolipid addition to soil toxicity and to crude oil biodegradation efficiency**. Global NEST J, 2009.

PEREIRA, A.; FREITAS, D.. Uso de microorganismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v.6, n.6, p.995-1006, 2012. DOI: <http://doi.org/10.5902/223611704818>

PEDROTI, G. I.. **Ensaios de biodegradabilidade aeróbia de hidrocarbonetos derivados do petróleo em solos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

PETERS, K. E.; MOLDOWAN, J. M.. **The biomarkers guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments**. New Jersey: Prentice Hall, Engle woods Cliffs, 1993.

PREVEDELLO, C. L.. **Física do solo**. Curitiba: SAEAFS, 1996.

QUIDEAU, S.; GUPTA, S.; MACKENZIE, M.. LANDHÄUSSER, S. M.. Microbial Response to Fertilization in Contrasting Soil Materials used during Oil Sands Reclamation. **Soil Sci Soc Am J**, 2012. DOI: <http://doi.org/10.2136/sssaj2012.0202>

RIZZO, A.; LEITE, S.; SORIANO, A.; SANTOS, R.; SOBRAL, L.. **Biorremediação de solos contaminados por petróleos: ênfase em biorreatores**. Rio de Janeiro: CETEM; MCTI, 2006.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A.. **Introdução à química ambiental**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

RUBERTO, L.; DIAS, R.; LO BALBO, A.; VAZQUEZ, S.; HERNANDEZ, E.; CORMACK, W. M.. Influence of nutrients addition and bioaugmentation on the hydrocarbon biodegradation of a chronically contaminated Antarctic soil. **App Microbiol**, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.04073.x>

SEABRA, P. N.. **Uso da biorremediação em áreas impactadas pela indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: CENPES, 2001.

SPEIGHT, J. G.; EL-GENDY, N. S.. Bioremediation of Contaminated Soil. **Introduction to Petroleum Biotechnology, Environmental Science**, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012063>

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L.. **Microbiologia**. 8 ed. Porto Alegre: Artmed, 2005.

TRINDADE, P. V. O.. **Avaliação das técnicas de bioaugmentação e bioestimulação no processo de biorremediação de solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

TRINDADE, P.; SOBRAL, L.; RIZZO, A.; LEITE, S.; SORIANO, A.. Bioremediation of a weathered and a recently oil-

contaminated soils from Brazil: a comparison study.
Chemosp, National Agricultural Library, 2005. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.021>

Os **autores** detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A **CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03)** detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.