



Estudo do processo de biorremediação em solos impactados por derramamento de petróleo

Study of the bioremediation process in soils impacted by oil spills

Amanda da Silva Santos⁽¹⁾; Tertuliano Ferreira Moreno⁽²⁾;
Leon Carvalho Vieira Cavalcante⁽³⁾; Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim⁽⁴⁾;
Dayana de Gusmão Coêlho⁽⁵⁾

⁽¹⁾ORCID: 0000-0001-9992-1077; Graduanda em Engenharia Química; Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia – CTEC, Maceió, Alagoas; Brasil. E-mail: amandassamanda70@gmail.com

⁽²⁾ORCID: 0000-0001-8357-7662; Graduando em Engenharia Química; Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Centro de Tecnologia – CTEC, Maceió, Alagoas; Brasil. E-mail: tertuliano.f.m@gmail.com

⁽³⁾ORCID: 0000-0001-8200-2568; Graduando em Engenharia Química; Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Centro de Tecnologia – CTEC, Maceió, Alagoas; Brasil. E-mail: Leonevcavalcante1998@gmail.com

⁽⁴⁾ORCID: 0000-0002-7349-9055; Professor; Universidade Federal de Alagoas - UFAL; Centro de Tecnologia - CTEC, Maceió, Alagoas; Brasil. E-mail: eduardo.lucena@uol.com.br

⁽⁵⁾ORCID: 0000-0002-5170-3449, Professora; Universidade Federal de Alagoas - UFAL; Centro de Tecnologia - CTEC, Maceió, Alagoas; Brasil. E-mail: dayana.coelho@ctec.ufal.br

Todo o conteúdo expresso neste artigo é de inteira responsabilidade dos seus autores.

Recebido em: 14 de dezembro de 2020; Aceito em: 14 de dezembro de 2020; publicado em 31 de janeiro de 2021. Copyright© Autor, 2021.

RESUMO: Devido ao derramamento de óleo no mar, que tem acontecido em diferentes cenários mundiais, as pesquisas têm-se voltado para processos de remediação que visam a degradação desse resíduo altamente tóxico e prejudicial para o meio ambiente. Os hidrocarbonetos, principais contaminantes, possuem características específicas e necessitam de tratamento adequado para serem descartados. O processo de biorremediação consiste no emprego de microrganismos para decompor contaminantes de interesse. O referente trabalho realizou uma revisão bibliográfica, a partir do levantamento de publicações sobre o tema e avaliou os diferentes métodos de remediação. As considerações finais após as análises realizadas, apontaram a biorremediação como melhor processo por se tratar de um método que não gera impactos negativos ao meio ambiente após sua aplicação e, por ser uma opção de tratamento viável, de baixo custo e que pode ser implantado em campo ou em sistemas fechados.

PALAVRAS-CHAVE: Biorremediação; Resíduos industriais; Meio ambiente.

ABSTRACT: Due to the oil spill at sea, which has been taking place in different world scenarios, research has turned to remediation processes aimed at the degradation of this highly toxic and environmentally harmful waste. Hydrocarbons, the main contaminants, have specific characteristics and need adequate treatment to be discarded. The bioremediation process consists of the use of microorganisms to decompose contaminants of interest. The referred work carried out a bibliographic review, from the survey of publications on the subject and evaluated the different methods of remediation. The final considerations after the analysis carried out, pointed out bioremediation as the best process because it is a method that does not generate negative impacts on the environment after its application and, because it is a viable, low-cost treatment option that can be implemented in the field or in closed systems.

KEYWORDS: Bioremediation; Industrial waste; Environment.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade enfrenta as consequências ambientais da sua crescente industrialização, dada a produção e despejo de compostos contaminantes diariamente, causando graves danos a todas as esferas da vida (GAUR et al., 2014). No âmbito de remediar os problemas que estes contaminantes podem trazer ao meio ambiente, há vários métodos, porém os métodos físico-químicos comumente utilizados não são apenas caros, mas os seus subprodutos são perigosos para o ambiente (GAUR et al., 2014).

Estudos recentes, como os de Quintella et al. (2019); Stelika; Kluk (2020); Zhang et al (2018) têm demonstrado que existem técnicas de remediação que possibilitam a eliminação destas contaminantes e, entre eles, a biorremediação é um tratamento natural que utiliza organismos e seus produtos para reduzir ou eliminar totalmente efeitos adversos dos poluentes no ambiente.

Os agentes de biorremediação os quais não agredem o meio ambiente, podem ser microrganismos, enzimas ou plantas (GAUR et al., 2014). A biorremediação é principalmente aplicada a matrizes como o solo, fluidos e vários tipos de águas residuais (Zhang et al., 2017), e pode ser aplicado in-situ ou ex-situ em biorreatores. A sua atratividade está na sua relação custo-eficácia e na sua compatibilidade ambiental, especialmente se aplicada in-situ.

Então, o presente trabalho tem como enfoque reforçar as formas de biorremediação aplicadas ao derramamento de petróleo em larga escala, assim como evidenciar os seus aspectos positivos quando comparados com outros tipos de remediação presentes para os contaminantes petrolíferos.

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente trabalho trata-se de um estudo de revisão bibliográfica, a partir do levantamento e seleção de materiais já publicados sobre o assunto, entre artigos científicos, livros, web sites científicos como Scielo, Google Scholar e Periódico Capes. O foco principal deste artigo consistiu em discutir e avaliar o processo de remediação em solos, em principal, a técnica de biorremediação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**Legislação Ambiental**

A legislação ambiental associada à quantidade tolerada de componentes tóxicos provenientes do derramamento de petróleo varia de acordo com cada país. Para o Brasil, os valores das concentrações de compostos como Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos, entre outros compostos, são determinadas pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), como pode-se observar na Tabela 1 (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

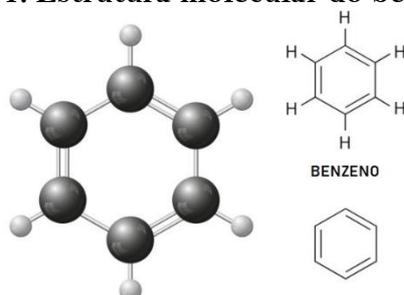
Tabela 1. Valores orientados para solo no Brasil.

Composto	Concentração em peso seco (mg.kg ⁻¹)			
	Valores de prevenção	Agrícola	Valores de intervenção residual	Industrial
Benzeno	0,03	0,06	0,08	0,15
Tolueno	0,14	30	30	75
Etilbenzeno	6,2	35	40	95
Xilenos	0,13	25	30	70
HPA	12,7	56,6	147,1	348,8
HTP	---	---	---	---

Fonte: ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010.

De acordo com a Tabela 1, para o composto HTP não existem valores de prevenção ou intervenção tanto para agrícola quanto para industrial. Além disso, os maiores valores de concentração de prevenção e intervenção são para os compostos de HPA e, em contrapartida, os menores valores de prevenção e intervenção é para o composto benzeno. O benzeno é um composto aromático, volátil, altamente inflamável e com toxicidade considerável, por isso, a sua concentração permitida deve ser baixa. Na Figura 1, observa-se a estrutura molecular desse hidrocarboneto (MUNDO EDUCAÇÃO, 2020).

Figura 1. Estrutura molecular do benzeno.



Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO, 2020.

Remediação

A USEPA define remediação como um conjunto de ações corretivas aplicáveis a um determinado sítio contaminado por resíduos perigosos. Na prática, essas ações minimizam os efeitos da contaminação, o que significa que dificilmente pode-se recuperar o sítio. Enquanto que Bitar (1997) define a remediação como técnicas de tratamento que se destinam a “eliminar, neutralizar, imobilizar, confinar ou transformar elementos ou substâncias presentes no ambiente e, assim, alcançar a estabilidade química do ambiente”. tais técnicas podem ser aplicadas sozinhas ou concomitantemente. (BERTENFELDER, 1992 apud ANJOS, 2012).

As técnicas de remediação evoluíram rapidamente, principalmente as oriundas dos processos consagrados na metalurgia. Porém, as pesquisas sobre sítios contaminados conviveram, por muito tempo, dividida em dois grandes grupos de tecnologias de remediação. A realizada ex situ, caracterizada por técnicas que promovem a remoção do solo para descontaminação e posterior reposição no local de origem ou disposição em aterro adequado. E a técnica in situ, realizada no local da contaminação, e sendo largamente utilizada tanto para remover a contaminação do solo como para as águas subterrâneas (ANDERSON, 1994 & USEPA, 1990 apud ANJOS, 2012).

De acordo com Furtado (1997) a tendência da tecnologia de remediação de áreas contaminadas é resolver problemas no local, in-situ, em oposição às tecnologias ex-situ, que podem ser desde a simples remoção do solo para destruição/aterramento ou da água para tratamento até o uso de biopilhas, onde se removem e empilham solos contaminados, misturados com matérias orgânicas, instalando-se tubulações para aeração e injetando nutrientes para incentivar a biodegradação. Nos meios técnicos, é

inquestionável que a melhor opção tecnologia tanto em custos, como em eficiência, será sempre a remediação in-situ (SANTOS, 2008).

As remediações implantadas, em sua maioria, são em postos de gasolina e utilizam tecnologias mais básicas, o bombeamento e tratamento, a recuperação de fase livre e extração multifásica para o tratamento das águas subterrâneas, e a extração de vapores e a remoção de solo/resíduo destacam-se como as técnicas mais utilizadas para os solos (SANTOS, 2008).

Os mecanismos utilizados para a remediação dos solos podem ser classificados como processos químicos, físicos, biológicos e térmicos. Seja qual for a tecnologia de remediação adotada para a descontaminação de uma determinada área, esta deve ser aplicada conforme as características intrínsecas de cada sítio contaminado, além de atender a legislação ambiental vigente, sendo compatível ao risco que a contaminação apresenta (TAVARES, 2013).

Biorremediação

A biorremediação é uma técnica de remediação biológica que, segundo Quintella et al. (2019) vem sendo amplamente empregada para amenizar ou eliminar os impactos gerados por contaminantes hidrocarbonetos de longas cadeias e de difícil remoção em sua maioria, petróleo e seus derivados. Dentre os processos utilizados na técnica de biorremediação podem ser citadas a bioaugmentação, bioestimulação, landfarming e entre outras.

Apesar de o tema ser bastante discutido e a técnica já ser aplicada amplamente em outros países, obtendo resultados satisfatórios, o Brasil ainda continua no âmbito teórico, realizando estudos, com poucas aplicações efetivas ou em larga escala, e se comparado a países os quais possuem números de trabalhos e patentes relacionados a esta área, o Brasil possui uma baixa produtividade como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2. Número de patentes distribuídas pelo mundo



Fonte: Adaptado de Quintella et al. (2019)

Os solos contaminados por hidrocarbonetos têm aumentado e isso se deve a derramamentos que, na maioria das vezes, ocorrem em alto mar e impactam não só os mares como também o solo, que absorvem esse material (TOMASSONI et al., 2014). Esses desastres ambientais podem ocorrer no ato de explorar e refinar o petróleo, como também, na sua logística de transporte em processos de compra e venda. Além desses tipos de contaminação, ainda há a questão do descarte incorreto de materiais como o óleo diesel que é descartado em esgotos comuns, como pias ou diretamente no solo (DEON et al., 2012; STELIGA; KLUK, 2020).

Tipos de Biorremediação

Existem diversos tipos de biorremediação e cada técnica é aplicada a depender da necessidade do problema, o tipo de contaminante e o solo impactado (BOHRER, 2012). O sucesso da biorremediação independe da aplicação da técnica (“in situ” ou em “ex situ”), mas requer controle do processo. A decisão a favor de umas das medidas depende principalmente das condições econômicas e técnicas e do tempo disponível (BERGER, 2005).

Bioventilação

Baseia-se na adição de oxigênio no solo impactado para aumentar ou estimular o crescimento microbiano natural ou introduzido. A quantidade de oxigênio molecular está relacionada com o potencial de biodegradação de diferentes compostos. Essa técnica tem como características a minimização da extração de vapores, o emprego de equipamentos simples e de fácil aplicação, aplicabilidade em locais de difícil acesso e com limitação a baixa taxa de umidade (TOMASSONI et al., 2014).

A bioventilação é eficiente no tratamento de qualquer contaminante degradável em meio aeróbico, particularmente é muito efetiva na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, é utilizada principalmente para tratar biodegradação aeróbia de contaminantes, como os compostos orgânicos voláteis e não-clorado SVOCs sendo mais recomendada para locais onde ocorreu a liberação de compostos com peso molecular médio (diesel) (LIMA, 2010; EPA, 2006).

Fitorremediação

A fitorremediação é uma técnica que utiliza as capacidades de absorção de plantas para a retirada de contaminantes do solo e das águas subterrâneas. No caso de contaminantes como o nitrato e outros nutrientes, a planta o utiliza para o seu próprio desenvolvimento, mas a técnica pode ser utilizada também para outros grupos de contaminantes, como metais. Neste caso, o contaminante pode ser assimilado à estrutura da planta e ali concentrado, que depois é removido do local (LIMA, 2010).

A grande vantagem desta técnica reside no seu baixo custo de implantação e manutenção, que a torna uma solução com muita potencialidade para contaminantes que se estendem por grandes áreas ou onde haja limitados recursos financeiros (LUIZ et al., 2016). Um ponto negativo desse método é que se deve levar em consideração o ciclo vital da planta escolhida, como também a dificuldade de selecionar a planta adequada ao tipo de solo que contém muitos contaminantes diferentes (TOMASSONI et al., 2014).

Bioaumentação

A bioaumentação ocorre pela adição de microrganismos específicos em regiões impactadas, adaptados em laboratório às condições ambientais. Ao usar essa técnica, faz-se a avaliação dos microrganismos presentes no ambiente, identificando-se os degradadores de óleo. Em seguida, através de biorreatores, estimula-se em laboratório o crescimento microbiano das espécies de interesse e, posteriormente, injeta-se o “pool” de microrganismos no local contaminado com o objetivo de estimular ou acelerar a biodegradação com a intensificação da população microbiana e, também, a otimização do ambiente contaminado. Essa técnica é usada quando o local contaminado não apresenta uma quantidade de microrganismos suficientes para que o processo ocorra de forma satisfatória (ROSA, 2006 apud LIMA, 2010).

Bioestimulação

A bioestimulação é a aceleração da reprodução microbiana e de suas atividades metabólicas, pela adição de oxigênio, água e nutrientes ao meio ambiente contaminado (ROSA, 2001). A bioestimulação de populações de microrganismos autóctones com o objetivo de aumentar as taxas de biodegradação é frequentemente empregada em projetos de biorremediação. Para se utilizar o processo de bioestimulação, deve-se demonstrar que existe no local contaminado uma população natural de microrganismos capazes de biodegradar os contaminantes presentes e que as condições ambientais são insuficientes para se obter altas taxas de atividade microbiológica dessa população (MARIANO, 2006 apud LIMA, 2010).

Biorreatores

Os biorreatores têm como diferencial entre as técnicas *ex situ*, o tratamento produzido em um ambiente fechado, o reator. O que por sua vez, apresenta uma maior vantagem de degradação biológica devido ao seu fácil controle, o que permite com que o tratamento se torne rápido e profícuo. Além disso, as concentrações de oxigênio,

nutrientes, teor de água, temperatura e pH são monitoradas em tempo real (BERGER, 2005). No entanto, para Berger (2005), os custos desse tratamento por meio de biorreatores tornam-se bastante elevado, devido ao deslocamento do material contaminado, seguido de um alto consumo energético e da necessidade de equipamentos sofisticados. No entanto, esta técnica é extremamente importante para a degradação de compostos altamente recalcitrantes.

Eletrobiorremediação

As técnicas eletrocinéticas baseiam-se na aplicação in-situ de um gradiente elétrico entre os eletrodos para a extração e migração dos contaminantes por mecanismos de transporte eletrocinético. Esse campo elétrico gera processos de transporte de íons, fluido nos poros e partículas eletricamente carregadas em direção aos eletrodos, promovendo no solo a extração de contaminantes ou ainda o transporte de nutrientes e aceptores de elétrons para melhorar as condições de biodegradabilidade de compostos orgânicos, estes fenômenos acontecem nos solos devido a capacidade dos fluídos intersticiais conduzirem corrente elétrica (FERNANDES, 2010 & SCHMIDT, 2004 apud BOHRER, 2012).

Vantagens e desvantagens da biorremediação

Como todo processo, a biorremediação possui vantagens e desvantagens associadas à sua execução e aos resultados associados. Tratando-se de vantagens do processo de biorremediação, tem-se: aplicação de equipamentos de fácil obtenção e aplicação, quando está em condições ótimas, apresenta menores custos em relação às outras técnicas que visam a mesma finalidade, geração de nenhum ou menos compostos tóxicos que precisam ser tratados após realização do processo e boa eficiência para degradar compostos derivados do petróleo (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Algumas características que são vistas como desvantagens para o processo de biorremediação, são: demanda de um período longo de monitoramento ou manutenção no local onde está sendo aplicado, procedimento visto como ineficiente para resíduos

orgânicos que ficam facilmente absorvidos pelo solo e dificulta a sua disponibilidade, alinhamento do processo ao ciclo de vida do microrganismo empregado, condições físicas e químicas influenciam na quantidade da taxa de degradação (ANDRADE;AUGUSTO; JARDIM, 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, é possível observar que alguns aspectos são bastante relevantes quando trata-se da implementação do processo de biorremediação em larga escala. A legislação ambiental brasileira determina valores limites permitidos no ambiente contaminado, assim, para HTP nenhum valor de máximo ou mínimo está associado, em contrapartida, os valores para o composto benzeno é o menor valor permitido, quando comparado a todos os compostos dispostos na Tabela 1. O processo de biorremediação destaca-se como mais efetivo quando comparado aos outros métodos de remediação, visto que após aplicado, os subprodutos gerados não necessitam de tratamento específico, o que não gera mais impactos negativos ao meio ambiente. Por fim, apesar desse processo demandar maior monitoramento e manutenção do local, além de necessitar de condições favoráveis à sua aplicação, apresenta-se como o mais fácil em relação a sua aplicação, sendo considerado de baixo custo e podendo ser implantado tanto em campo quanto em sistema fechado.

REFERÊNCIAS

1. ANDRADE, Juliano de Almeida. AUGUSTO, Fabio. JARDIM, Isabel Cristina Sales. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*, Vol. 35, no 3, 2010.
2. ANJOS, Jose Ângelo Sebastião Araujo dos. SÁNCHEZ, Luis Enrique. BERTOLINO, Luiz Carlos. Remediação de áreas contaminadas: proposições para o sítio da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/BA. In: *Projeto Santo Amaro - BA, aglutinando ideias, construindo soluções: diagnósticos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.10, p.103-130.

3. BERGER, Thomas Michael. Biorremediação de solos contaminados com Hidrocarbonetos Totais de Petróleo – Enfoque na aplicação do processo Terraferm. 2005. 86f Tese (Doutorado em Ecologia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
4. BITAR, Omar Yazbek. Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 1997. 185p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
5. BOHRER, Robson Evaldo Gehlen. Eletrobiorremediação e avaliação da atividade biológica de solos. 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2012.
6. CARNEIRO, Danielle de Arruda. GARIGLIO, Lucas Paulo. A biorremediação como ferramenta para a descontaminação de ambientes terrestres e aquáticos. *Tecer*, Belo Horizonte, v. 3, n. 4, p.82-95, 2010.
7. DEON, Maitê Carla. ROSSI, Andréa de. DAL'MAGRO, Clinei. REINEHR, Christian Oliveira. COLLA, Luciane Maria. Biorremediação de solos contaminados com resíduos óleo de bioaumentação e atenuação natural. 2012. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 33, n. 1, p. 73-82, jan./jun.2012.
8. EPA - Environmental Protection Agency (EUA). Design Document for Passive Bioventing. How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers, 2006 (EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002). Disponível em: http://www.epa.gov/swerust1/pubs/tum_ch3.pdf. Acesso em: 02 de nov. de 2020.
9. FURTADO, M. R. Remediação: controle ambiental chega ao subsolo. *Revista Química e Derivados*. 1997.
10. GAUR, Nisha. FLORA, Gagan. YADAV, Mahavir. TIWARI, Archana. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environ. Sci. Process. Impacts*. 16 (2), 180–193. 2013.
11. LIMA, Danúsia Ferreira. Biorremediação em sedimentos impactados por petróleo na baía de todos os santos, Bahia: avaliação da degradação de

hidrocarbonetos saturados. Dissertação (Dissertação em Geologia) – UFBA.
Bahia. 2010.

12. LUIZ, Mariana Bernardino. HIRATA, Ricardo. TERADA, Rafael. SARAIVA, Fernando. TASSE, Nario. Fitorremediação de aquíferos contaminados por nitrato. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2016. Anais eletrônicos... São Paulo, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28704>>; Acesso em: 02 de nov. de 2020.
13. MUNDO EDUCAÇÃO. 2020. Benzeno. Virtual. Disponível em:<<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/benzeno.htm>>. Acesso em 04 de nov. de 2020.
14. ROSA, A. P. Processos de biorremediação na mitigação do impacto ambiental, devido a eventuais derrames de óleo na bacia de campos - experimentos laboratoriais. 2001. 145f. Tese (Mestrado em Engenharia de Reservatório e Exploração de Petróleo), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé – RJ, 2001.
15. 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.
16. SANTOS, Edson. UNGARI, Helio Cesar Nascimento. Principais técnicas de remediação e gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos no Estado de São Paulo. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Monografia, 129. 2008.
17. STELIGA, Teresa & Kluk, Dorota. Application of Festuca arundinacea in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110409. 2020.
18. TAVARES, Silvio Roberto de Lucena. Técnicas de remediação. In: *TAVARES, S. R. L. (Org.). Remediação de solos e águas contaminadas: conceitos básicos e fundamentos*. São Paulo: Clube de Autores, p.59-90. 2013.
19. TOMASSONI, Fabíola. SANTOS, Reginaldo Ferreira. SANTOS, Felipe Samways. CARPINSKI, Marinez; SILVEIRA, Lucas. Técnica de biorremediação do solo. 2014. *Acta Iguazu, Cascavel*, v.3, n.3, p. 46-56, 2014.

20. ZHANG, S., Gedalanga, P.B., Mahendra, S. Advances in bioremediation of 1,4-dioxane contaminated waters. *J. Environ. Manag.* 204, 765–774. 2017.
21. ZHANG, F. Inventor. Xi An Huanuo Environment Protection. Assignee. Composite Inoculant for Deep Oil Contaminated Soil Bioremediation Process. China patent CN106244479. 2016.