

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS: UM ESTUDO DE CASO

Jéssica Nayara de Souza

Orientador: Edson R. Nucci

Ouro Branco

Setembro/2013

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS: UM ESTUDO DE CASO

Jéssica Nayara de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
em cumprimento às exigências do Curso de
Bacharelado em Engenharia de Bioprocessos
da Universidade Federal de São João Del-Rei.

Orientador: Edson R. Nucci

Ouro Branco

Setembro/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CURSO DE ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS: UM ESTUDO DE CASO

Jéssica Nayara de Souza

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, avaliou este TCC:

Edson Romano Nucci
Orientador

André Aguiar Mendes
Examinador

Marcell Otávio Cerri
Examinador

Ouro Branco, 05/09/2013

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivo Específico	3
3. BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS	4
3.1 Remediação: física e química	5
3.2 Biodegradação de contaminantes	5
3.3 Fatores que influenciam a biorremediação	7
3.3.1 pH	8
3.3.2 Temperatura	8
3.3.3 Concentração de oxigênio	9
3.3.4 Água	9
3.3.5 Nutrientes inorgânicos	9
3.3.6 Compostos tóxicos	9
3.4 Técnicas de biorremediação	10
3.4.1 Método <i>ex situ</i>	10
3.4.2 Método <i>in situ</i>	11
3.5 Biodegradação de hidrocarbonetos no solo	12
3.6 Vantagens e Desvantagens da biorremediação	13
4. BIOAUMENTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO DA BIORREMEDIAÇÃO	14
4.1 Biodegradação do herbicida atrazina a partir de fungos	15
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	19
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população e a industrialização são os principais responsáveis pela grande contaminação do meio ambiente. As atividades industriais estão crescendo cada dia mais e junto com elas crescem os riscos ambientais que podem causar grandes danos ao solo, gerando problemas sociais (ALMEIDA, 2010). A competição brasileira por novos mercados soma-se a necessidade de melhorar a imagem do país em relação à preservação da biodiversidade. Desse modo, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), os recursos naturais de que dispõe o país têm sua importância decisiva no plano econômico. Em 1998 criou-se a Lei de Crimes Ambientais, a qual responsabiliza as companhias em caso de danos ambientais. Esta lei é um instrumento que foi adicionado aos órgãos reguladores já disponíveis para as agências ambientais brasileiras. Aliados a danos ambientais, a ocorrência do aumento de áreas contaminadas se dá pela falta de conhecimento e de leis mais rígidas (ALMEIDA, 2010).

O uso de produtos químicos na agricultura como pesticidas tem apresentado grande crescimento, com isto aumenta os riscos associados à contaminação de solos (SOARES *et al.*, 2011; ASSUNÇÃO, 2010). Em muitos casos o ecossistema do solo deve ser capaz de recuperar suas funções e sua diversidade naturalmente. Quando isso não é possível podem-se incluir processos físicos, químicos ou biológicos, tanto no local (*in situ*) como fora do local contaminado (*ex situ*). O procedimento para remediação e consequente recuperação dessas áreas é lento e está relacionado à capacidade de restabelecimento do solo (SOARES *et al.*, 2011; (BRADY, 2013).

O método físico envolve a remoção de contaminantes do solo através de escavações, porém, ele não se baseia em uma recuperação, embora o resultado do local afetado seja eficaz. O fato de este tratamento ser físico pode ser vantajoso por não haver adição de reagentes, no entanto, após este método podem ser necessárias medidas de contenção e outro tipo de tratamento, como químico ou biológico. No processo químico, os compostos são destruídos, fixados e/ou neutralizados por reações químicas. A principal vantagem é que a destruição de produtos químicos biologicamente recalcitrantes é possível, e substâncias tóxicas podem ser convertidas quimicamente a um produto biologicamente mais ou menos disponível no meio. No entanto, o método que tem recebido grande importância nos últimos anos é a remediação utilizando processos biológicos, que envolve a transformação de contaminantes tóxicos a produtos menos agravantes para o meio (EVANS, 2011).

O processo biológico pode ser chamado de biorremediação, que consiste em utilizar meios naturais como plantas e micro-organismos, para eliminar ou minimizar produtos nocivos ao solo, além de explorar a capacidade natural de micro-organismos para metabolizar substâncias orgânicas. É um dos métodos mais ecológicos, versáteis e que tem sido utilizado com sucesso na remediação de solos contaminados (BRADY, 2013; SILVA-CASTRO *et al.*, 2012). No contexto de biorremediação existem duas técnicas, *in situ* e *ex situ*. O método *in situ* o solo contaminado é tratado no local onde o mesmo permanece, evitando custos com escavação, transporte de tratamento e descarte final. A bioestimulação é uma das formas mais imediatas e simples no tratamento que envolve a adição de nutrientes como nitrogênio e oxigênio necessários para a aceleração do processo de degradação. Há também a bioaugmentação, onde, se introduz micro-organismos selecionados no solo contaminado para degradar e aumentar a velocidade do processo de biodegradação do contaminante. O método *ex situ* consiste em se fazer a remoção do solo contaminado para recipientes onde o mesmo pode ser incinerado. Algumas vezes se utiliza técnicas em comum com o método *in situ* como, aplicação de água, lixiviação, e até mesmo o uso de surfactantes, que são substâncias que dissolvem contaminantes orgânicos que estejam no solo (BRADY, 2013).

Além de a biorremediação ser uma alternativa de remediação de locais impactados com poluentes orgânicos, o maior benefício desse processo é a mineralização, obtendo como produto final CO₂ e água pela via aeróbica, assim como a formação de biomassa (MACEDO, 2002). Assim, pode ser usada para complementar o monitoramento nos estudos de impactos ambientais e avaliar a diversidade genética de amostras no local. Estudando o efeito da presença de um determinado poluente na estrutura da comunidade microbiana, é possível verificar àqueles que se adaptam e atuam no processo de biorremediação (CUNHA, 2008).

Nesta revisão bibliográfica a biotecnologia estudada foi a bioaugmentação, que consiste na modificação do solo visando eliminar ou diminuir fatores limitantes ao crescimento e desenvolvimento dos micro-organismos. Para isso são utilizados culturas de micro-organismos de ocorrência natural, como bactérias, fungos filamentosos e/ou leveduras capazes de transformar compostos não degradáveis em substâncias com pouco ou nenhuma toxicidade (JERÔNIMO, 2012).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo bibliográfico de modo a abranger as principais ferramentas utilizadas no processo de biodegradação de solos contaminados.

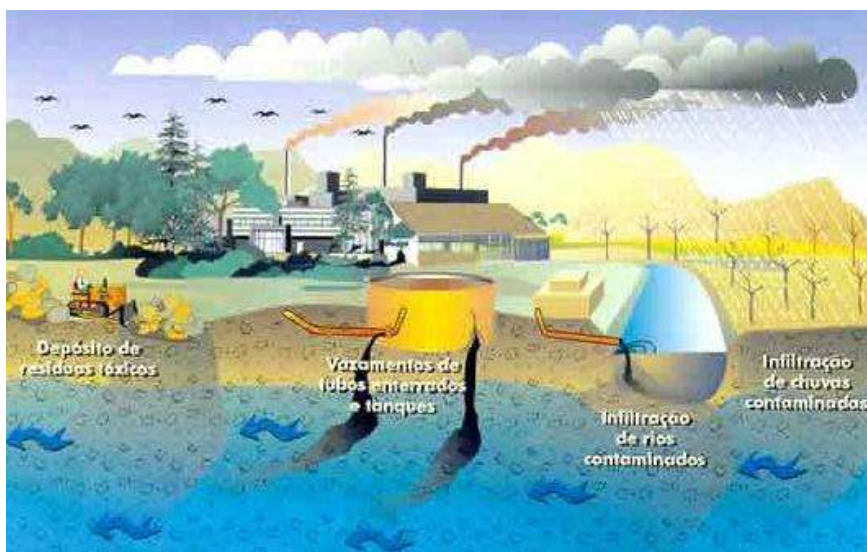
2.2 Objetivo específico

- 1- Buscar na literatura trabalhos relacionados ao processo de biodegradação de solos contaminados.
- 2- Realizar o entendimento da metodologia utilizada.
- 3- Avaliar um processo específico de biorremediação: a bioaumentação em solos contaminados com herbicida Atrazina.

3 BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS

A qualidade de vida na terra está ligada a qualidade global do meio ambiente. No início dos tempos acreditava-se que havia terra e recursos em abundância, hoje, no entanto, se sabe que os recursos do mundo são dependentes do seu cuidado e utilização. A industrialização e extração de recursos naturais resultaram em grande escala, a poluição e a contaminação ambiental. A figura 1 ilustra maneiras como podem ocorrer as contaminações em um local industrial. Assim, os problemas associados com locais contaminados agora assume uma crescente importância em muitos países, como o Brasil. Cada um dos seres vivos está exposto à contaminação de práticas industriais do passado e do presente como emissões de poluentes em recursos naturais (ar, água e solo). O risco para a saúde humana e saúde ambiental está crescendo e há evidências de que este coquetel de poluentes possa ser um contribuinte para a epidemia global de doenças graves (PASSOS, 2006).

Figura 1- Contaminação ambiental em uma área industrial



Fonte: Google Imagens

A produção e utilização em larga escala de produtos orgânicos têm levado a sérios problemas ambientais nas últimas décadas, sendo que muitos destes compostos podem persistir no ambiente por muito tempo (PASSOS, 2006).

O principal desafio para eliminar esses contaminantes é o desenvolvimento de soluções inovadoras e de baixo custo para remover estes compostos do solo, assim protegendo principalmente o funcionamento do ecossistema. Muitas das tecnologias tradicionais utilizadas na remediação de locais contaminados envolvem o uso de processos físico-químicos que se limitam a concentrar o poluente ou transferi-lo para um outro ambiente, mas há alguns anos, vem sendo estudados métodos mais eficazes e sustentáveis para este fim, como os processos biológicos (VIDAL, 2001; PRASAD, 2011; LIMA, 2003).

3.1 Remediações físicas e químicas

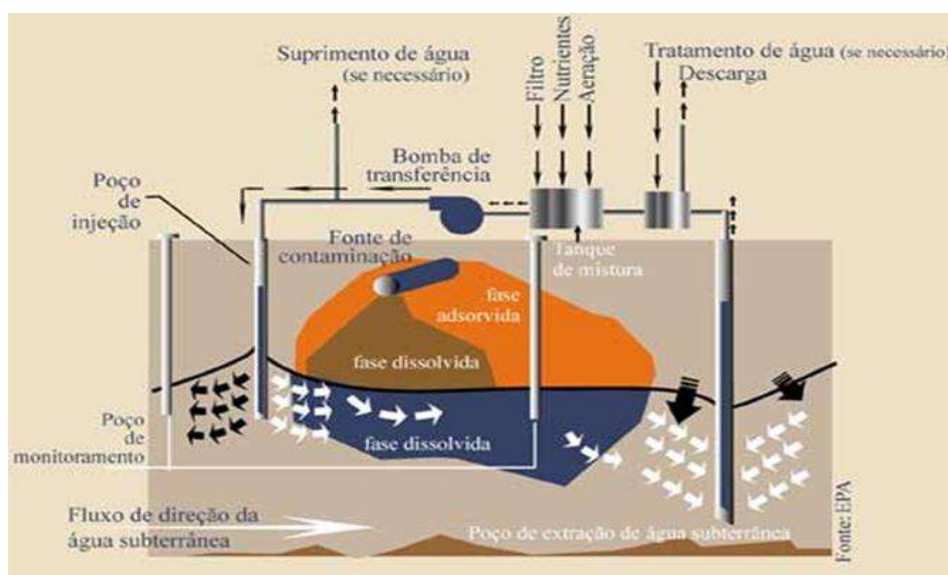
O tratamento físico separa os contaminantes do solo sem destruí-los ou modificá-los quimicamente, porém ele precisa ser tratado posteriormente através de um tratamento químico ou biológico. Esse processo apresenta muitas limitações, destacando-se o alto custo. Já os tratamentos químicos utilizam processos oxidativos, onde há o uso de agentes oxidantes para produzir radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), uma espécie altamente oxidante e pouco seletiva. No entanto como a maioria das tecnologias, esse tratamento também tem limitações que devem ser reconhecidas. Há situações em que este método é ineficaz na degradação dos contaminantes como quando há camadas no solo de baixa permeabilidade, favorecendo a ocorrência frequente de repiques de contaminação após a aplicação do oxidante químico, elevando sobremaneira o tempo de remediação. Sendo assim, informações específicas da área e dos contaminantes devem ser devidamente reunidas e analisadas ao se avaliar a adequação da utilização do melhor método para cada situação. Os métodos de remediação físicos e químicos como solução para a descontaminação de solos, já foram muito utilizados até se descobrir tratamentos mais eficazes e economicamente viáveis, além de não gerar resíduos. Esses tratamentos são os biológicos. O tratamento biológico é uma tecnologia promissora devido à simplicidade e eficiência de custo quando comparados a outras alternativas (física e química) (SILVA-CASTRO *et al.*, 2012).

3.2 Biodegradação de contaminantes

Uma vez que as principais causas de poluição são os derrames e fugas de substâncias biodegradáveis, nomeadas combustíveis derivadas do petróleo, a biorremediação, nas suas várias formas, é a tecnologia mais utilizada hoje em dia no tratamento de solos (ALMEIDA, 2010). A figura 2 ilustra uma área contaminada (solo) e os possíveis métodos de remediação.

Fundamentada nos processos naturais de atenuação para remover ou conter os contaminantes dissolvidos no solo, a biorremediação ou biodegradação pode ser realizada através de populações microbianas, e vem se apresentando como um processo bastante promissor por ser considerada uma forma natural de tratamento. O principal objetivo deste mecanismo é obter níveis de degradação até o limite de detecção do poluente ou abaixo dos valores aceitáveis ou estabelecidos pelas agências reguladoras, Agência Nacional de Águas (ANA) vinculada ao MMA, respectivamente (ALMEIDA, 2010).

Figura 2- Área contaminada e os principais métodos de remediação.



Fonte: EPA

A biodegradação é a quebra de contaminantes orgânicos que ocorre devido à atividade microbiana. Como tal, estes contaminantes podem ser considerados como a fonte de alimento ou substrato microbianos. A biodegradação pode ser pensada como uma série de passos de degradação biológica ou uma via que resulta na oxidação do contaminante inicial. A mineralização ou biodegradação completa envolve a oxidação do composto contaminante para formar dióxido de carbono e água, um processo que proporciona carbono e energia para o crescimento e reprodução das células. Além disso, possui outras vantagens sobre outras tecnologias (físico-químicas) como: os custos são competitivos se comparados aos processos

físicos e químicos; pode ser aplicável a uma vasta gama de poluentes; é uma tecnologia limpa, não causando danos ao meio ambiente;

Porém também possui algumas desvantagens como: alguns contaminantes podem não ser biodegradáveis a este processo; dependendo do método utilizado, o processo de biodegradação pode ser lento; se houver concentrações baixas de poluentes, mas acima do valor estabelecido pela legislação, pode limitar a cinética de remoção biológica, o que resulta em níveis baixos de degradação do poluente (ALMEIDA, 2010; LIMA, 2003).

Os poluentes podem ser variados, porém, dois grupos ocorrem com mais frequência, são os halogenados (compostos orgânicos que contém halogênios) e os hidrocarbonetos. Estes são poluentes orgânicos e decorrem de descargas em lagoas ou lixeiras, de resíduos líquidos provenientes de operações de desengorduramento ou limpeza de peças. A utilização de pesticidas e de adubos, derivados de compostos inorgânicos na agricultura também pode provocar a contaminação difusa sobre áreas muito extensas, contaminando aquíferos e impossibilitando o uso dessas águas como fonte potável. O processo de biorremediação se dá através de reações bioquímicas que são mediadas por micro-organismos do solo. Nas condições subsuperficiais é possível encontrar populações de micro-organismos, as quais geralmente são formadas por bactérias, fungos e protozoários. Alguns compostos orgânicos são rapidamente biodegradados enquanto outros são recalcitrantes (não biodegradáveis). Hidrocarbonetos com baixa a média peso molecular e álcoois são exemplos de compostos facilmente biodegradáveis, pois quando há aumento das cadeias implica em uma maior complexidade estrutural e, conseqüentemente, em uma diminuição do número de micro-organismos capazes de degradar estes compostos. Já compostos xenobióticos, compostos químicos ou moléculas estranhas ao sistema biológico, especialmente hidrocarbonetos halogenados, tendem a ser resistentes à biodegradação. Para estes compostos recalcitrantes, estudos estão sendo mais detalhados em laboratórios, conhecendo-se para alguns deles as vias metabólicas de degradação (LIMA, 2003; MARIANO, 2006).

3.3 Fatores que influenciam a biorremediação

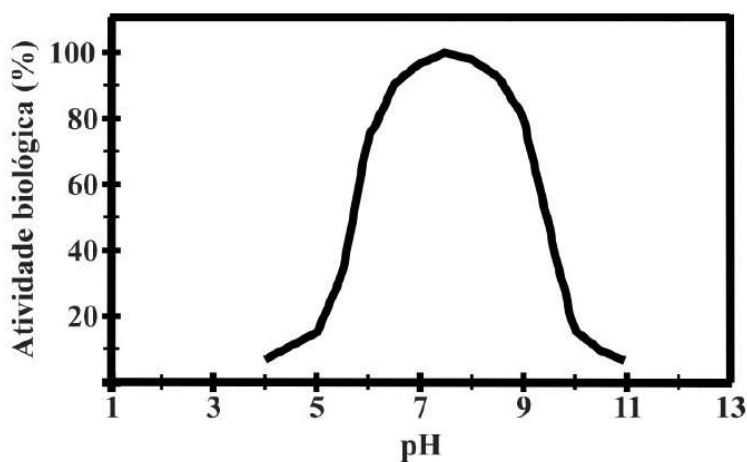
O controle e otimização do método de biorremediação é um sistema complexo e pode ser influenciado por vários fatores, que incluem: a existência de uma população microbiana capaz de degradar os poluentes, disponibilidade de contaminantes para esta população microbiana e fatores ambientais. Os fatores mais importantes que influenciam a biorremediação de solos são pH,

temperatura, concentração de oxigênio, porcentagem de água, nutrientes inorgânicos e compostos tóxicos. As condições ótimas são adquiridas quando o contaminante é o fator limitante e as necessidades ambientais são satisfeitas (VIDALI, 2001).

3.3.1 pH

Muitos micro-organismos crescem bem em pH 6 a 9, com o pH ótimo entre 7 e 8, como mostra a figura 3. A biorremediação pode ocorrer com valores diferentes destes, acima ou abaixo, dependendo da espécie microbiana envolvida. Se o solo for ácido, é possível adicionar compostos básicos à base de cálcio e magnésio (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

Figura 3- Variação de pH x atividade biológica de micro-organismos



Fonte: scielo.br

3.3.2 Temperatura

É um dos fatores mais importantes no crescimento microbiano. Os micro-organismos possuem temperaturas ótimas onde seu crescimento aumenta significativamente. Porém, devem-se ficar atentos a temperatura ótima do microrganismo que compõe o solo, pois, eles podem morrer. A temperatura que a maioria das bactérias presentes no solo apresentam atividade entre 5 e 40°C (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

3.3.3 Concentração de oxigênio

A quantidade de oxigênio presente no solo determina se o sistema vai ser aeróbico ou anaeróbico. Se o sistema for aeróbico, para uma melhor degradação do contaminante deverá ser feita a aeração do solo com injeções de O₂ através de água arejada (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

3.3.4 Água

A quantidade de água existente no solo tem influência no transporte de oxigênio, a solubilidade dos constituintes do solo e pH. Se o solo estiver muito úmido as trocas gasosas vão ser inibidas originando zonas anaeróbicas, enquanto que valores baixos de umidade originam zonas de solos muito secas e de baixa atividade microbiana (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

3.3.5 Nutrientes inorgânicos

Os nutrientes são de grande importância para os micro-organismos crescerem. Os nutrientes básicos para os micro-organismos são fósforo (P) e nitrogênio (N), que muitas vezes se encontram em concentrações muito baixas em locais contaminados. É importante que esses nutrientes sejam fornecidos em formas facilmente assimiláveis pelos micro-organismos (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

3.3.6 Compostos tóxicos

A concentração de compostos tóxicos deve ser avaliada antes de se iniciar uma biorremediação, pois, além de compostos orgânicos, os metais pesados são inibidores do metabolismo e do crescimento de micro-organismos, assim deve-se conhecer a concentração desses compostos para saber qual é o melhor processo a se realizar (LIMA, 2003; EVANZ, 2011).

O que deve ser evidente é que, os itens citados não são de forma alguma os únicos aspectos que influenciam o uso de biotecnologias de remediação. Depende das circunstâncias e de outros fatores que podem desempenhar um papel importante na determinação da reparação deste processo. E se mesmo assim os micro-organismos não conseguirem degradar o contaminante, podem ser feitos processos de remediação físico e/ou químico, concomitantemente (LIMA, 2003; EVANS, 2011).

3.4 Técnicas de biorremediação

Inicialmente as etapas de implementação de um processo de biorremediação compreende no estudo do local, tipo de contaminante, riscos e consequências no ambiente. As primeiras avaliações ocorrem em laboratório, para saber qual é o tipo de contaminante, qual a melhor técnica a se utilizar. Essas avaliações são feitas com o objetivo de otimizar o processo, buscando métodos mais eficazes para cada problema. As técnicas de biorremediação são descritas como *ex situ* e *in situ* (PASSOS, 2006).

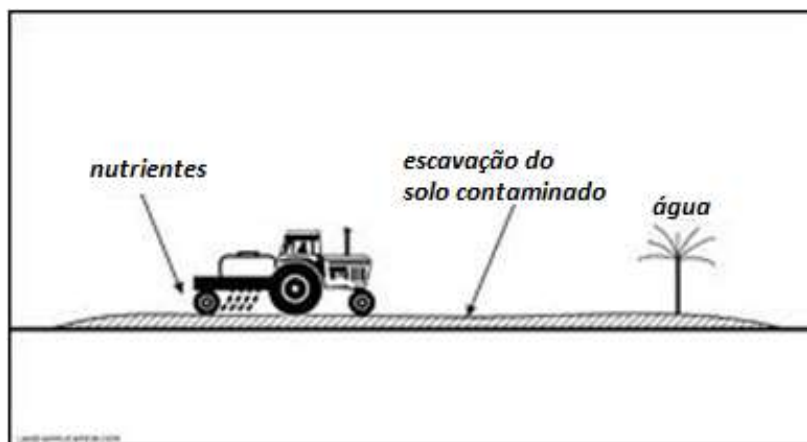
3.4.1 Método *ex situ*

Nos processos *ex situ* de biorremediação, o meio é extraído e tratado em instalação específica. No entanto longos períodos de tempo, espaço físico, tratamento do material contaminado e altos custos estão normalmente associados com a grande maioria dos processos utilizados para remediação de áreas contaminadas (ALMEIDA, 2010; MENEGHETTI, 2007). O método *ex situ* pode ser feito através de dois processos, *Landfarming* e compostagem.

Landfarming, é uma técnica simples onde o solo é escavado e espalhado formando uma cama (figura 4). A cama é feita com uma altura máxima de 0,5 m pois, assim os micro-organismo são capazes absorver oxigênio do ar. No fundo e ao redor da cama é preciso colocar uma barreira onde a mesma impedirá que os contaminantes espalhem pelo local de tratamento. O solo é lavrado e adicionado nutrientes até que os poluentes sejam degradados.

A compostagem é um processo onde são feitos montantes do material contaminado juntamente com o solo, resíduos agrícolas ou esterco, que possua uma alta concentração de matéria orgânica que, combinados degradam os contaminantes em uma alta percentagem (figura 5). Estes materiais contém uma população microbiana rica que possuem uma elevada característica de temperatura de compostagem (VIDALI, 2001).

Figura 4- Processo *Landfarming*.



Fonte: Google imagens

Figura 5- Tratamento com compostagem usado na biorremediação de solos.



Fonte: GUTIERREZ *et al.*, 2011.

3.4.2 Método *in situ*

Os processos *in situ*, a remediação é feita no próprio local contaminado. Apesar de muitas vezes estar limitada por dificuldades no transporte de nutrientes ou receptores de elétrons e no controle das condições de aclimação e degradação dos contaminantes nos sistemas

subterrâneos, está sendo uma maneira muito usada e pesquisada para o controle e descontaminação de solos, além de ser atrativa pelo baixo custo, menor impacto ao ambiente e facilidade de sua aplicação em relação às técnicas de bioremediação *ex situ* (ALMEIDA, 2010; MENEGHETTI, 2007). De acordo com parâmetros como origem dos microrganismos, adição ou não de nutrientes, esta biorremediação pode ser realizada através de três processos:

Biorremediação intrínseca, que se baseia em processos naturais de atenuação para remover ou conter os contaminantes. A remediação natural monitora o deslocamento do contaminante e assegura que os pontos receptores (poços de abastecimento de água, rios, lagos) não serão contaminados.

A *bioestimulação* é quando o crescimento dos micro-organismos naturais, autóctones, é estimulado por práticas que incluem a introdução de: oxigênio, nitrogênio, nutrientes, substâncias para correção do pH do meio e receptores de elétrons específicos para a degradação da contaminação.

Bioaumentação envolve a adição de micro-organismos não-indígenos, não residentes, no local contaminado, onde foi identificada uma insuficiência de micro-organismos indígenas ou autóctones para a biodegradação do contaminante em questão (VIDALI, 2001; ASSUNÇÃO, 2010).

3.5 Biodegradação de hidrocarbonetos no solo

Sabe-se que os hidrocarbonetos podem ser degradados através de três vias metabólicas: respiração aeróbica, respiração anaeróbia e via fermentativa. Na via aeróbia, a primeira etapa da biodegradação consiste na oxidação do hidrocarboneto, que é promovida por enzimas oxigenases. Nessa via, o oxigênio é utilizado como aceptor final de elétrons e os produtos finais são, principalmente, CO₂ e H₂O. Na respiração anaeróbia substratos inorgânicos desempenham a função de aceptores finais de elétrons, onde o CO₂ é reduzido a metano, sulfato a sulfeto, nitrato a nitrogênio molecular ou íon amônio. Já a degradação por via fermentativa caracteriza-se por empregar os substratos fosforilados como aceptores finais de elétrons, resultando em compostos como CO₂, acetato, entre outros. Leva-se em consideração que a via de degradação será dependente do tipo de contaminante e dos micro-organismos existentes no local (RIZZO *et al.*, 2006).

3.6 Vantagens e Desvantagens da Biorremediação

As vantagens da biorremediação são: a habilidade dos micro-organismos de biodegradar compostos perigosos ao invés de transferir o contaminante de um meio para outro; este processo é eficiente em meios homogêneos e de textura arenosa; possui baixo custo se comparado a outras técnicas de remediação; produtos utilizados não apresentam riscos ao meio ambiente, desde que estejam em baixas concentrações e não são tóxicos, uso em área de proteção ambiental (ASSUNÇÃO & ROHLFS, 2010).

Porém, como todo e qualquer processo existe algumas desvantagens, como: não é uma solução imediata; método ainda pouco evoluído no Brasil; maior dificuldade de aclimação dos microrganismos; limitações de escala para aplicação *in situ*; limitações em função de heterogeneidade em subsuperfície; inibição por compostos competidores e substâncias tóxicas ao micro-organismo inviabiliza o processo (ASSUNÇÃO & ROHLFS, 2010). Além disso, esta técnica tem-se deparado com empecilhos relacionados à dificuldade de aplicação em solos impermeáveis ou que apresentem metais pesados em sua composição e à possibilidade de se gerar produtos intermediários nocivos (MACEDO, 2002).

O processo de avaliação do processo de biorremediação pode ser feito através de técnicas de biologia molecular. Através dos avanços no conhecimento da bioinformática, tornou-se possível uma avaliação e caracterização mais detalhada do solo. Sabendo qual tipo de micro-organismo o solo contém torna mais fácil os processos de remediação, além de ser possível manipular geneticamente o micro-organismo desejado. Essas ferramentas permitem avaliar a dinâmica populacional de um determinado ecossistema frente ao impacto causado pela presença do poluente e frente às diversas formas de tratamento utilizadas (CUNHA *et al.*, 2008).

4 BIOAUMENTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO DA BIORREMEDIAÇÃO.

O solo possui uma grande comunidade microbiana sendo altamente diversificada, podendo exibir alta capacidade de degradação. Quando esta capacidade é expressa rapidamente, produtos químicos orgânicos são facilmente destruídos. No entanto, alguns compostos sintéticos podem persistir por algum tempo nesse ambiente, mesmo que essas moléculas sejam biodegradáveis. Uma maneira de tentar resolver este problema é a inoculação de micro-organismos no meio, o que pode melhorar a degradação desses compostos. Tal inoculação é chamada de bioaumentação (ALEXANDER, 2009).

A bioaumentação tem sido praticada já há algum tempo principalmente na agricultura e em tratamentos de efluentes, mas além de ser bastante aplicada, ainda é experimental. Nesse processo, a capacidade de adaptação dos micro-organismos nativos não é normalmente focada. O que vem sendo estudado é a capacidade dos micro-organismos pré-adaptados degradarem mais rápido o composto em questão. Antes de aplicar a bioaumentação é recomendável fazer uma análise do micro-organismo em laboratório para descobrir sobre sua forma de ação e tolerância. Considera-se que dentro desta população nativa há microrganismos capazes de biodegradar os compostos poluentes, e há populações não-desejáveis, sem capacidade de biodegradação e que ainda compete com os primeiros por fatores de crescimento e oxigênio (PASSOS, 2006; JERÔNIMO *et al.*, 2012).

A bioaumentação pode se estabelecer quando os micro-organismos do meio não são capazes de degradar compostos poluentes, logo, uma população microbiana pode ser selecionada e adicionada ao local. Antes da contaminação o sistema encontra-se em homeostase, quando esse equilíbrio é perturbado permite uma maior degradação dos compostos orgânicos poluentes pelos microrganismos introduzidos e pelos nativos, que estavam sendo impedidos de degradar em todo seu potencial, devido ao equilíbrio entre as populações presentes no meio. Outra possibilidade de aplicação deste método ocorre nos casos em que a microbiota nativa é eliminada ou diminuída devido ao choque de carga orgânica ou adição de produtos tóxicos (JERÔNIMO, 2012).

Um aspecto importante é que o sucesso dessa técnica depende altamente da sobrevivência do inóculo no meio. Quando se adiciona uma alta população microbiana selecionada para a degradação de altas taxas orgânicas, a homeostase se rompe. Além disso, os micro-organismos

aplicados devem atuar em sinergismo com as espécies autóctones, sem interferir nos processos biogeoquímicos naturais (CARDOSO, 2012).

4.1 Biodegradação do Herbicida Atrazina a partir de Fungos

Em função do uso intensivo de produtos químicos na agricultura moderna, principalmente para a produção de alimentos, e da formação de grandes quantidades de resíduos, nos últimos anos tem levada a uma maior preocupação em se conhecer o comportamento e destino dos pesticidas, nos diversos ecossistemas. O emprego destes agentes químicos resultou em aumento da produtividade, mas por outro lado trouxe consequências adversas ao homem, visto serem estes agentes nocivos ao homem e ao ambiente (PRIMAZ, 2008).

Com a finalidade de aumento da produtividade e garantia da produção de alimentos, na agricultura são utilizados pesticidas, que fazem o controle de insetos, micro-organismos e plantas daninhas. Porém, apesar dos pesticidas terem efeito benéfico sobre a produtividade agrícola, deve-se considerar o risco potencial desses compostos químicos no ambiente, o que tem despertado o interesse científico para a biodegradação de pesticidas e compostos relacionados (PRIMAZ, 2008).

De acordo com o Secretaria da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), o herbicida atrazina (figura 6) é apresentado sob a forma de suspensão concentrada com eficiência no controle da maioria das plantas daninhas, tanto em aplicação de pré-emergência como em pós-emergência precoce. Eles têm a função de inibir a fotossíntese da planta daninha. A atrazina é um contaminante potencial da água e do solo em virtude de suas características: alto potencial de escoamento, elevada persistência em solos, hidrólise lenta, solubilidade baixa para moderada em água, absorção moderada à matéria orgânica e argila. A simazina, que é um tipo de atrazina, tem se acumulado extensivamente no ambiente em virtude de seu uso por mais de 40 anos e de sua estrutura dificilmente biodegradável. Em função disso, foram realizadas experiências em laboratório com alguns micro-organismos do solo e descobriram que, algumas espécies microbianas são capazes de metabolizar parcialmente os compostos triazínicos, tais como *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Aspergillus fumigatus* e *Rhizopus stolonifer*. A mineralização total desses compostos pode ser realizada por consórcios microbianos ou culturas mistas com 2 ou mais micro-organismos (PRIMAZ, 2008).

Figura 6- Herbicida atrazina, utilizada na agricultura de vários alimentos.

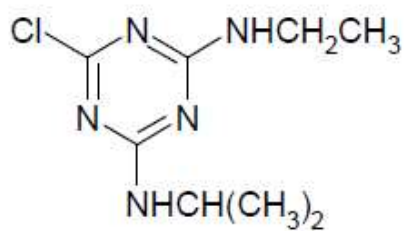


Fonte: <http://afecor.com/atrazina.php>

As elevadas velocidades de crescimento para os fungos *Aspergillus*, *Penicillium* e *Trichoderma*, indicam a habilidade dos mesmos de crescerem em meios contendo triazinas, além de eles produzirem enzimas responsáveis pela degradação dos pesticidas, como mostrado por PRIMAZ (2008), podendo ser utilizados em estudos de biorremediação de herbicidas triazínicos, através do uso das técnicas de bioaugmentação e bioestimulação. A capacidade dos fungos de crescerem na presença de compostos supostamente tóxicos é uma característica fundamental para os estudos de degradação, e muitas vezes estão relacionadas à capacidade de detoxificação do mesmo (PEREIRA, 2011).

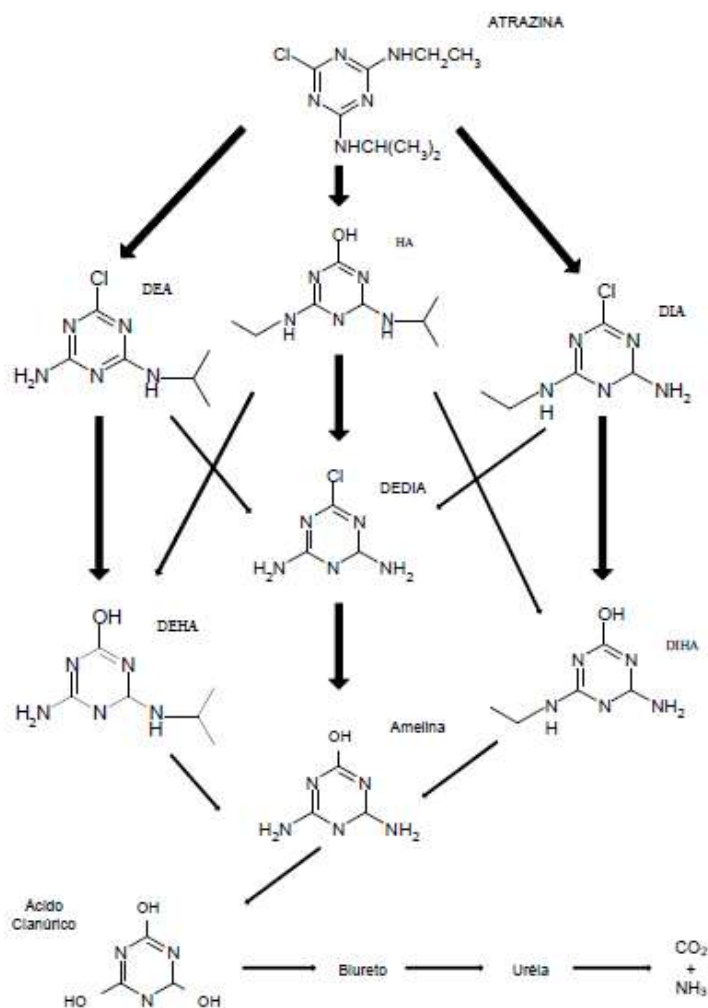
A degradação da atrazina por fungos geralmente segue vias bioquímicas que envolvem a remoção sequencial de substituintes do anel aromático (figura 7), iniciando pela desalquilação, primeiro e principal passo da via metabólica do composto, gerando ao final do processo CO_2 e NH_3 (figura 8). Os principais produtos de degradação da atrazina são compostos hidroxilados e clorados. Com isso, há um consenso de que estes produtos da degradação da atrazina são substancialmente menos tóxicos e normalmente não estão presentes no ambiente em concentrações inibidoras de algas, bactérias, plantas ou animais (PEREIRA, 2011).

Figura 7- Estrutura molecular do Herbicida Atrazina.



Fonte: PEREIRA, 2011.

Figura 8- Degradação da Atrazina no solo.



Fonte: PEREIRA, 2011.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revolução industrial trouxe grandes benefícios e tecnologias e com isso um enorme aumento da poluição e produção de resíduos. Muitos dos problemas ambientais de hoje são resultados da má gestão do lixo, principalmente industrial, sendo os locais contaminados uma consequência frequente do manuseamento e eliminação inadequados de compostos perigosos.

Em função de resíduos e no contexto do uso intensivo de produtos químicos na agricultura moderna, nos últimos anos tem havido uma maior preocupação em se conhecer o comportamento e destino desses produtos nos diversos ecossistemas. Podem ser realizados vários métodos de remediação de solos, dentre eles físicos e químicos. No entanto, essas técnicas possuem algumas desvantagens como a necessidade de técnicas posteriores aos métodos citados.

Com o intuito de minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente uma alternativa é o tratamento biológico, ou seja, biorremediação, que é um processo natural onde, são utilizados micro-organismos capazes de degradar ou minimizar os efeitos nocivos ao solo. Entre os processos de biorremediação, destaca-se a bioaugmentação, onde se tem a adição de micro-organismos, mais usualmente bactérias e fungos. Os micro-organismos utilizam o contaminante como substrato, gerando ao final produtos menos agressivos ou nada tóxicos ao ambiente.

O uso de pesticidas tem se difundido muito na agricultura nos últimos 40 anos. Os pesticidas químicos têm sido muito utilizados para controle de plantas daninhas. Porém, o uso intensivo dos pesticidas causam várias consequências como solos e águas contaminadas. Um exemplo é o herbicida atrazina, muito usado em agriculturas de milho, cana-de-açúcar e soja. Para degradar esses contaminantes podem ser feitos processos químicos ou biológicos. Em processos biológicos são utilizados fungos ou bactérias que degradam a atrazina gerando produtos menos ou nada tóxicos.

Assim, o presente estudo demonstra que a biorremediação é um método eficaz, onde se tem micro-organismos (fungos e bactérias) capazes de degradar contaminantes presentes no solo, advindos de pesticidas, reduzindo o uso de produtos químicos que podem gerar resíduos e danos à saúde humana.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar com mais detalhes e avaliar o processo de biodegradação de hidrocarbonetos e outros poluentes nocivos em solos próximos a “lava carros”.
- Realizar estudos em laboratório para, otimização de processos de degradabilidade de contaminantes do solo através de micro-organismos, variando constantes como, pH, temperatura, oxigênio, nutrientes, entre outros.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, M. **Biodegradation and biorremediation**. Second Edition. 2009.

ALMEIDA, V.L.; **Principais técnicas de biorremediação *in situ* utilizadas na recuperação de áreas contaminadas por derivados de petróleo** – Goiás. 2010. Pós-Graduação em Biociências Forenses, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2010.

ASSUNÇÃO, L.P.G.; ROHLFS, D.B.; **Biorremediação em áreas contaminadas** – Goiás. 2010. Pós-graduação em biociências forenses, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2010.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R.; **Elementos da natureza e propriedades dos solos**– 3.ed, p.602 – 622, 2013.

CARDOSO, G. M.; **Bioaumentação em reatores anaeróbio e aeróbio e uso de reator nitrificante para redução da carga orgânica e nitrogenada**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria- Centro de Tecnologia. Santa Maria- RS. 2012.

CUNHA, C. D.; LEITE, S. G. F.; ROSADO, A. S.; ROSÁRIO, M.; **Série Tecnologia Ambiental Biorremediação de água subterrânea contaminada com gasolina e análise molecular da comunidade bacteriana presente**. CETEM/MCT. 2008.

EVANS, M.G.; FURLONG, J.C.; **Environmental biotechnology- Theory and application– Contaminated land and Bio-Remediation**, 2011, p. 91 – 113. 2011.

GUTIERREZ, A.; GUNDES, A.; RABELO, J.; XAVIER, M.; RINCO, N.; **Biorremediação- A tecnologia recuperando vidas. Blog [Internet]. Rio de Janeiro: 2011-Nov**. Disponível em: <<http://biorremediacaobyomega.blogspot.com.br/>> Acesso em 06 de Agosto de 2013.

JERÔNIMO, C. E. M.; FERNANDES, H. G.; MELO, H. N. S.; SOUSA, J. F.; **Bioaumentação para degradação de efluentes do processamento da castanha de caju**. Departamento de Engenharia Química. Universidade Potiguar. Universidade Federal do R. G. do Norte. 2012.

LIMA, N.; MOTA, M.; **Biotecnologia - Fundamentos e aplicações**. 2003, p.285 – 298. 2003.

MACEDO, R. C.; BERBERT, V. H. C.; **Biorremediação de solos impactados por óleo cru utilizando fungos filamentosos**. CEFETQ – Nilópolis/RJ. 2002.

MAIER, R.M.; PEPPER, I.L.; GERB, C.P.; **Environmental microbiology**. Second edition.

MARIANO, A.P.; **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel** - Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, SP. Dezembro, 2006.

MENEGHETTI, L.R.R.; **Bioremediação na descontaminação de um solo residual de basalto contaminado com óleo diesel e biodiesel** – Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Área de Concentração: Infra-estrutura e Meio Ambiente, Passo Fundo- 2007.

PASSOS, C. T.; **Estudo da biodegradação do fenol por uma nova linhagem de *Aspergillus sp.*** Programa de Pós-Graduação. Departamento de Química. Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande-RS. 2006

PEREIRA, P. M.; **Avaliação do potencial de fungos na degradação do herbicida atrazina**. Programa de Pós-Graduação em Vigilância Sanitária - Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro/RJ, 2011.

PRASAD, M.N.V.; **A state-of-the-art report on bioremediation, its applications to contaminated sites in India** - Dept. of Plant Sciences, University of Hyderabad, Hyderabad. 2011.

PRIMAZ, A.L.; LIMA, M.; **Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas triazínicos**. Faculdade de Engenharia e Arquitetura/FEAR - Universidade de Passo Fundo/UPF - Passo Fundo/RS. Junho – 2008.

RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.; SORIANO, A. U.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S.; **Biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores**. Série Tecnologia Ambiental. Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. 2006.

SILVA-CASTRO, G.A; RODELAS, B; PERUCHA, C; LAGUNA, J; LÓPEZ, J.G; CALVO, C; **Bioremediation of diesel-polluted soil using bioestimulation as post-treatment after**

oxidation with fenton-like reagents: assays in a pilot plant – Spain. 2012. Institute of Water Research, University of Granada, Spain, 2012.

SOARES, I.A.; FLORES, A.C.; MENDONÇA, M.M.; BARCELOS, R.P.; BARONI, S. **Fungos na biorremediação de áreas degradadas** – Santo Antônio/BA. 2011. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências da Saúde, 2011.

VIDAL, M.; **Biorremediation. an overview** – Dipartimento di Chimica Inorganica, Metallorganica, e Analitica, Università di Padova Via Loredan. 2001.

Disponível em: <<http://www.agricultura.pr.gov.br/>> - Acesso em 20 de Julho de 2013.

Disponível em: <<http://biorremediacaobyomega.blogspot.com.br/2011/11/biorremediacao-de-solos.html>> - Acesso em 29 de Julho de 2013.

Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/meioambi.pdf>> - Acesso em 06 de Agosto de 2013.