



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR PESTICIDAS – UMA REVISÃO DE LITERATURA

Antônio Rony da Silva Pereira Rodrigues, Universidade Estadual do Ceará,
ronny346silva@gmail.com

Resumo

Nas últimas décadas, os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e frequentes, principalmente devido ao desmedido crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial, logo necessitando do aumento também da produção de alimentos. A busca dos trabalhos foi realizada entre os meses de junho a agosto de 2021, em 3 bases de dados: LILACS, PubMed e ScienceDirect. Foram aplicados os seguintes critérios de inclusão: artigos publicados entre 2016 a 2021, em qualquer idioma, que estivessem disponíveis na íntegra e que respondessem o objetivo do estudo. No levantamento bibliográfico foram obtidos 1.317 artigos. Desses coletados 12 foram coletados na LILACS, 1.277 na Science Direct e 38 na PubMed. De modo geral, foi possível comprovar que as técnicas de biorremediação demonstram uma alternativa viável na descontaminação de solos poluídos por pesticidas, por ser de baixo custo de implementação, e menor risco ambiental do que técnicas de limpeza que envolvem processos físicos e químicos.

Palavras-chave: Biorremediação; Agrotóxicos; Solo; Tecnologias combinadas.

1. Introdução

Nas últimas décadas, os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e frequentes, principalmente devido ao desmedido crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial. Com estes elementos, os problemas devido à ação antrópica têm atingido dimensões catastróficas, podendo ser observados por meio de alterações na qualidade do solo, do ar e da água (KUNZ et al, 2002). Devido ao crescimento populacional, o consumo de alimentos consequentemente cresceu e para acompanhar esse crescimento a ciência teve que procurar novos meios e tecnologias para produzir alimentos maiores e em maior escala.

O principal meio foi elaborar alimentos mais resistentes as pragas ou combater as pragas agrícolas através de defensivos químicos, os agrotóxicos. Os agrotóxicos, chamados também de defensivos agrícolas, biocidas, agroquímicos, agrotóxicos produtos fitossanitários, praguicidas e pesticidas são agentes constituídos por uma grande variedade de compostos químicos ou biológicos, desenvolvidos para eliminar, combater, repelir ou controlar insetos (ABRASCO,2019).

O uso contínuo e prolongado de agrotóxicos está diretamente ligado a presença de distúrbios na saúde humana e problemas ambientais. No meio ambiente os pesticidas são os um dos causadores pelas mortes de peixes em rios e lagos, além da contaminação do solo e dos sistemas subterrâneos de água que consequentemente pode provocar problemas relacionados a saúde humana. Pesticidas como Aldrin em doses moderadas pode causar tontura, dores de



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

cabeça, vômitos, movimento muscular descontrolado, em doses grandes pode causar convulsões e levar a morte. O Clordano causa danos sistema nervoso, sistema digestivo, efeitos no fígado, dores de cabeça, irritabilidade, confusão, fraqueza, problemas de visão, vômitos, cólicas estomacais, diarreia e icterícia em doses menores (GREEN, 2004).

Contaminação do solo

Muitas substâncias podem provocar a contaminação do solo como resíduos agrícolas e industriais, mas atualmente defensivos agrícolas, metais pesados e derivados de petróleo são os principais causadores de contaminação no solo.

O acúmulo de resíduos de agrotóxicos no solo ocorre nas camadas superficiais, as quais abrigam uma vasta biodiversidade de organismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes e das quais as plantas retiram os nutrientes para o seu crescimento e desenvolvimento. A contaminação do solo por agrotóxicos pode ocorrer principalmente através do uso direto nas plantas, através do uso de água contaminada ou contaminação pelo contato do solo com embalagens contaminadas, depositadas indevidamente sem a realização do triplice lavagem (COSTA, 2004).

Os metais pesados, embora possam ser essenciais ao desenvolvimento das plantas, sob alta concentração podem se tornar tóxicos, se tornando um desafio para o desenvolvimento. No caso da presença excessiva de metais pesados no solo, além de inibir o crescimento de diversas plantas causando alterações nas comunidades vegetais, também exercem efeitos adversos sobre os microrganismos do solo, interferindo nas funções do ecossistema, com consequências ao meio ambiente e à saúde pública, visto que a contaminação dos sistemas biológicos por metais pesados, pode resultar em distúrbios como a oxidação do DNA, lesões pré-mutagênicas, erros de pareamento e de replicação, produzindo mutagênese, carcinogênese, teratogenicidade e morte celular de uma vasta gama de organismos (GRISOLIA, 2005; MILHOME, 2018).

Biorremediação

Biorremediação é um processo em que organismos, normalmente plantas, microrganismos ou suas enzimas, são utilizados para remover ou reduzir poluentes do ambiente (PEREIRA; FREITAS, 2012).

A biorremediação vem sendo desenvolvida visando explorar a diversidade genética e a versatilidade metabólica microbiana para a transformação de contaminantes, em produtos menos tóxicos, que podem ser integrados nos ciclos biogeoquímicos naturais (UETA et al., 1999). Às vezes, para uma degradação eficiente requer a remoção do material contaminado para outros locais (*ex situ*) nesses casos se usam as técnicas de landfarming, biopilhas e o tratamento em biorreatores. Quando o contaminante não necessita de remoção (*in situ*), frequentemente é necessário acrescentar substâncias para efetivar atividade dos microrganismos ou inserir no local microrganismos alóctones.

Os microrganismos não possuem todas as rotas enzimáticas catabólicas capazes de degradar todos os compostos novos que a os seres humana sintetiza e despacham no meio. Quanto mais próxima é a estrutura química de um xenobiótico à de moléculas naturais, maior a chance de sucesso na biorremediação (FRANCISCO; QUEIROZ, 2018).



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

A degradação pode ocorrer por através do metabolismo de respiração aeróbia ou anaeróbia. Assim, para que ocorra a biodegradação completa ou a mineralização, o composto original precisa ser oxidado formando dióxido de carbono e água, ocorrendo assim a produção de energia que é utilizada na síntese de biomassa (MUCETA,2012). As bactérias, fungos e enzimas estão entre os principais biorremediadores e, recentemente até mesmo minhocas também estão sendo usadas como auxiliares na descontaminação, principalmente em solos.

Biorremediação *ex situ*

As técnicas de biorremediação *ex-situ* são aquelas em que o material contaminado é removido do local de origem e posteriormente é encaminhado para tratamento em local adequado (COUTINHO et al, 2015). Após o tratamento, tem-se um grande volume de material que é ser destinado para um aterro sanitário ou para o local de origem.

Biorremediação *in situ*

As técnicas de remediação *in situ* são aquelas em que não há necessidade de remoção do material, sendo esta realizada no próprio local contaminado (PEREIRA & FREITAS, 2012). Essa técnica evita o aumento de custos e distúrbios ambientais sendo relacionados com o movimento de solos e águas contaminados para os locais de tratamento. Entre as técnicas mais utilizadas nos processos *in situ* na biorremediação encontram-se bioestimulação (SILVEIRA, 2016) e bioaugmentação (DE SOUZA, 2021).

Biorremediação bacteriana

O solo já possui microrganismos que atuam degradando substâncias indesejadas no solo e na água. Petrolífera fazem uso de biorremediação utilizando cerca de 48 toneladas de fertilizantes para aumentar a população natural de bactérias capazes de degradar petróleo e, após três anos, a área contaminada representa apenas 1% da extensão original (KERBER,2020).

Um importante projeto brasileiro da equipe iGEM UFRGS se destaca ao usar *Escherichia coli*, programadas geneticamente para romper a molécula do glifosato (defensivo agrícola) e atuar em áreas contaminadas visando degradar esse poluente.

Biorremediação enzimática

As enzimas são catalisadores biológicos que facilitam a conversão de substratos em produtos fornecendo condições favoráveis que reduzem a ativação da energia da reação (KARIGAR & RAO,2011). As enzimas têm papel fundamental na biodegradação de quaisquer xenobióticos e são capazes de renovar poluentes a uma taxa perceptível e têm perspectiva de restaurar o ambiente poluído (RAO, M.A et al, 2010).

Regiões de enzimas envolvidas em processos catalíticos são conhecidas como sítios ativos, cuja associação com o resto da proteína ocorre por meio de ligações covalentes ou não covalentes. Uma enzima pode ter um ou mais grupos catalíticos essenciais ou locais ativos. Estas são conhecidas como apoenzimas se forem feitas de proteína ou grupo protético se forem não proteicas ou holoenzima se for uma combinação das duas (KARIGAR & RAO, 2011).

Todas as enzimas são categorizadas em seis grupos: - sintetases também conhecidas como ligases, isomerases, liases, hidrolases, transferases e oxidoredutases. Várias enzimas degradadoras de OP já foram estudadas. Entre elas, as hidrolases mais estudadas são as enzimas



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

degradantes de *Pseudomonas diminuta* e o de *Agrobacterium radiobacter* (HORNE et al., 2006).

Biorremediação fúngica

Muitos fungos são aplicados como biotecnologia para degradação de compostos tóxicos presentes no solo. Alguns dos microrganismos que diminuem o grau de toxicidade de compostos organofosforados são os seguintes: diversos tipos de fungos como *Hypholoma fasciculare* e *Coriolus versicolor*, *Flammulina velupites*, *Stereum hirsutum*, *Coriolus versicolor*, *Dichomitus squalens*, *Hypholoma fasciculare* e *Auricularia auricula* que demonstram ter uma forte aceleração da degradação desses compostos (WATANABE et al., 2000).

2. Fundamentação teórica

Pesticidas: conceito e regularização no Brasil e no mundo

A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2017), definiu um pesticida como um composto químico usado para matar pragas, incluindo insetos, roedores, fungos e plantas indesejáveis.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), definiu um pesticida como qualquer substância ou mistura de substâncias que buscam prevenir, destruir ou controlar uma praga, incluindo vetores de doenças em humanos ou animais, de ervas daninhas ou animais que causam danos direto ou indiretamente no processo de produção, processamento, armazenamento ou comercialização de alimentos, produtos agrícolas, madeira e produtos de madeira ou alimentos para animais, ou que podem ser administrados a animais para o controle de insetos, aracnídeos ou outras pragas.

Os 14 pesticidas mais utilizados a nível mundial atualmente são 2,4-D, Aldicarbe, Atrazina, Clorotalonil, Clorpirifós, Diazinon, Dicamba, Diuron, Glifosato, Malathion, Mancozeb, MCPA, Metolaclo e Trifluralina. Os produtos agrícolas foram classificados em quatro grupos: grãos (milho, trigo e arroz), hortaliças (tomate, cebola e batata), frutas (maçã, banana, uva e laranja), e bebidas (grãos de café e folhas de chá), sendo estas as culturas onde mais se utilizam agrotóxicos, segundo o Global MRL Database (2014).

No Brasil, dos dez princípios ativos mais utilizados, três são proibidos na União Europeia (acefato, atrazina e paraquate), mas são de uso autorizado nos Estados Unidos, Japão, China e nos demais países do Mercosul. Estes agrotóxicos respondem por cerca de 70% do total utilizado no Brasil: glifosato; 2,4-D; mancozebe; acefato; óleo mineral; atrazina; óleo vegetal; paraquate (dicloreto); imidacloprido; e oxicloreto de cobre (ANVISA, 2018; PAN CONSOLIDATED, 2018).



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 16 a 18 de novembro de 2021

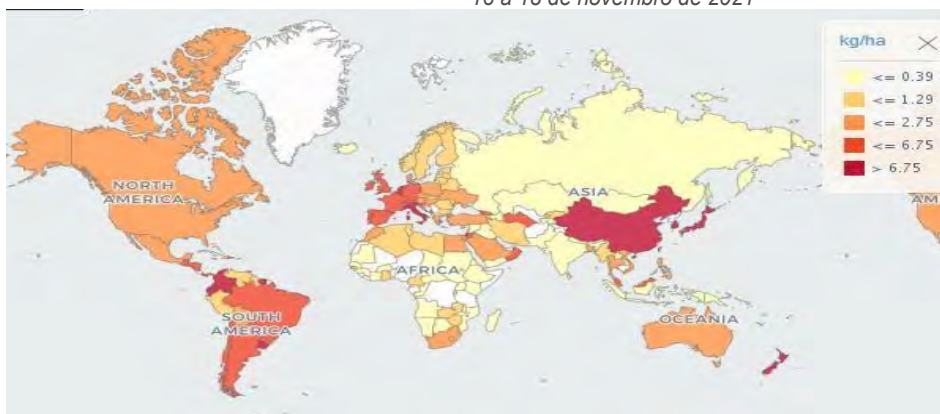


Figura 1: Pesticidas - Uso por área de cultivo (kg / ha). Média 2000 – 2019

Fonte: FAO, 2021.

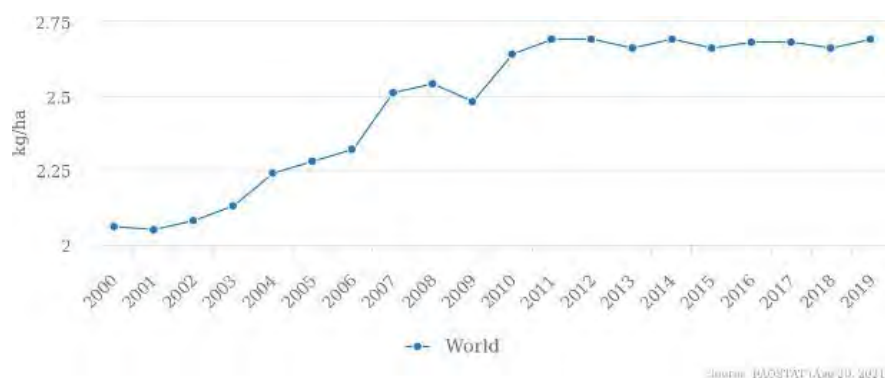


Figura 2: Pesticidas - Uso médio por área de cultivo no mundo (2000 – 2019).

Fonte: FAO, 2021

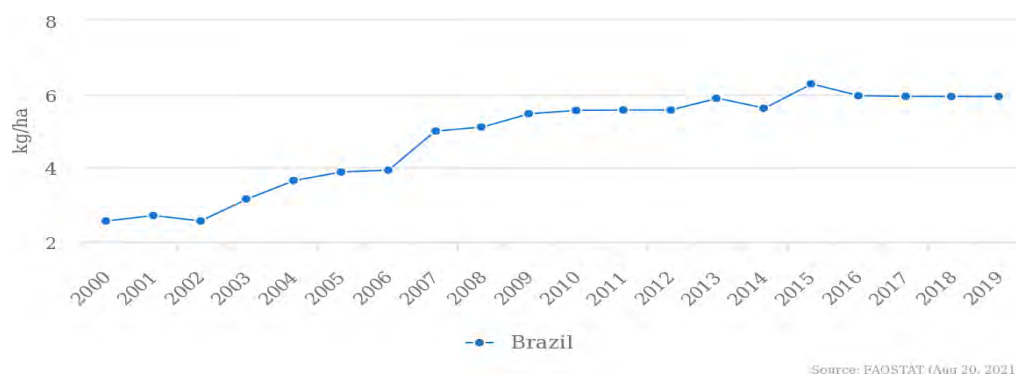


Figura 3: Pesticidas - Uso médio por área de cultivo no Brasil (2000 – 2019)

Fonte: FAO, 2021



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

Uma nova regularização para agrotóxicos foi formulada no ano de 2019 pela Anvisa (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). A reclassificação foi necessária pois, com o novo marco regulatório do setor, o Brasil passou a adotar os parâmetros de classificação toxicológica de agrotóxicos com base nos padrões do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals – GHS). Com isso, o Brasil passou a ter regras harmonizadas com as de países da União Europeia e da Ásia, entre outros, facilitando a comercialização de produtos nacionais no exterior (GILSON, et al., 2020).

A classificação em função da toxicidade aguda agora é determinada e identificada com os respectivos nomes das categorias e cores no rótulo dos produtos, de acordo com o estabelecido abaixo:

- Categoria 1: Produto Extremamente Tóxico – faixa vermelha.
- Categoria 2: Produto Altamente Tóxico – faixa vermelha.
- Categoria 3: Produto Moderadamente Tóxico – faixa amarela.
- Categoria 4: Produto Pouco Tóxico – faixa azul.
- Categoria 5: Produto Improvável de Causar Dano Agudo – faixa azul.
- Não Classificado – Produto Não Classificado – faixa verde.

Contaminação do solo

Muitas substâncias podem provocar a contaminação do solo como resíduos agrícolas e industriais, mas atualmente defensivos agrícolas, metais pesados e derivados de petróleo são os principais causadores de contaminação no solo.

O acúmulo de resíduos de agrotóxicos no solo ocorre nas camadas superficiais, as quais abrigam uma vasta biodiversidade de organismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes e das quais as plantas retiram os nutrientes para o seu crescimento e desenvolvimento. A contaminação do solo por agrotóxicos pode ocorrer principalmente através do uso direto nas plantas, através do uso de água contaminada ou contaminação pelo contato do solo com embalagens contaminadas, depositadas indevidamente sem a realização do triplice lavagem (COSTA, 2004).

Os metais pesados, embora possam ser essenciais ao desenvolvimento das plantas, sob alta concentração podem se tornar tóxicos, se tornando um desafio para o desenvolvimento. No caso da presença excessiva de metais pesados no solo, além de inibir o crescimento de diversas plantas causando alterações nas comunidades vegetais, também exercem efeitos adversos sobre os microrganismos do solo, interferindo nas funções do ecossistema, com consequências ao meio ambiente e à saúde pública, visto que a contaminação dos sistemas biológicos por metais pesados, pode resultar em distúrbios como a oxidação do DNA, lesões pré-mutagênicas, erros de pareamento e de replicação, produzindo mutagênese, carcinogênese, teratogenicidade e morte celular de uma vasta gama de organismos (GRISOLIA, 2005; MILHOME, 2018).



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

Biorremediação

Biorremediação é um processo em que organismos, normalmente plantas, microrganismos ou suas enzimas, são utilizados para remover ou reduzir poluentes do ambiente (PEREIRA; FREITAS, 2012).

A biorremediação vem sendo desenvolvida visando explorar a diversidade genética e a versatilidade metabólica microbiana para a transformação de contaminantes, em produtos menos tóxicos, que podem ser integrados nos ciclos biogeoquímicos naturais (UETA et al., 1999). Às vezes, para uma degradação eficiente requer a remoção do material contaminado para outros locais (*ex situ*) nesses casos se usam as técnicas de landfarming, biopilhas e o tratamento em biorreatores. Quando o contaminante não necessita de remoção (*in situ*), frequentemente é necessário acrescentar substâncias para efetivar atividade dos microrganismos ou inserir no local microrganismos alóctones.

Os microrganismos não possuem todas as rotas enzimáticas catabólicas capazes de degradar todos os compostos novos que a os seres humana sintetiza e despacham no meio. Quanto mais próxima é a estrutura química de um xenobiótico à de moléculas naturais, maior a chance de sucesso na biorremediação (FRANSCISCO; QUEIROZ, 2018).

A degradação pode ocorrer por através do metabolismo de respiração aeróbia ou anaeróbia. Assim, para que ocorra a biodegradação completa ou a mineralização, o composto original precisa ser oxidado formando dióxido de carbono e água, ocorrendo assim à produção de energia que é utilizada na síntese de biomassa (MUCETA,2012). As bactérias, fungos e enzimas estão entre os principais biorremediadores e, recentemente até mesmo minhocas também estão sendo usadas como auxiliares na descontaminação, principalmente em solos.

Biorremediação *ex situ*

As técnicas de biorremediação *ex-situ* são aquelas em que o material contaminado é removido do local de origem e posteriormente é encaminhado para tratamento em local adequado (COUTINHO et al, 2015). Após o tratamento, tem-se um grande volume de material que é ser destinado para um aterro sanitário ou para o local de origem.

Biorremediação *in situ*

As técnicas de remediação *in situ* são aquelas em que não há necessidade de remoção do material, sendo esta realizada no próprio local contaminado (PEREIRA & FREITAS, 2012). Essa técnica evita o aumento de custos e distúrbios ambientais sendo relacionados com o movimento de solos e águas contaminados para os locais de tratamento. Entre as técnicas mais utilizadas nos processos *in situ* na biorremediação encontram- bioestimulação (SILVEIRA, 2016) e bioaugmentação (DE SOUZA, 2021).

Biorremediação bacteriana

O solo já possui microrganismos que atuam degradando substâncias indesejadas no solo e na água. Petrolífera fazem uso de biorremediação utilizando cerca de 48 toneladas de fertilizantes para aumenta a população natural de bactérias capazes de degradar petróleo e, após três anos, a área contaminada representa apenas 1% da extensão original (KERBER,2020).



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

Um importante projeto brasileiro da equipe iGEM UFRGS se destaca ao usar *Escherichia coli*, programadas geneticamente para romper a molécula do glifosato (defensivo agrícola) e atuar em áreas contaminadas visando degradar esse poluente.

Biorremediação enzimática

As enzimas são catalisadores biológicos que facilitam a conversão de substratos em produtos fornecendo condições favoráveis que reduzem a ativação da energia da reação (KARIGAR & RAO, 2011). As enzimas têm papel fundamental na biodegradação de quaisquer xenobióticos e são capazes de renovar poluentes a uma taxa perceptível e têm perspectiva de restaurar o ambiente poluído (RAO, M.A et al, 2010).

Regiões de enzimas envolvidas em processos catalíticos são conhecidas como sítios ativos, cuja associação com o resto da proteína ocorre por meio de ligações covalentes ou não covalentes. Uma enzima pode ter um ou mais grupos catalíticos essenciais ou locais ativos. Estas são conhecidas como apoenzimas se forem feitas de proteína ou grupo protético se forem não proteicas ou holoenzima se for uma combinação das duas (KARIGAR & RAO, 2011).

Todas as enzimas são categorizadas em seis grupos: - sintetases também conhecidas como ligases, isomerases, liases, hidrolases, transferases e oxidorredutases. Várias enzimas degradadoras de OP já foram estudadas. Entre elas, as hidrolases mais estudadas são as enzimas degradantes de *Pseudomonas diminuta* e o de *Agrobacterium radiobacter* (HORNE et al., 2006).

Biorremediação fúngica

Muitos fungos são aplicados como biotecnologia para degradação de compostos tóxicos presentes no solo. Alguns dos microrganismos que diminuem o grau de toxicidade de compostos organofosforados são os seguintes: diversos tipos de fungos como *Hypholoma fasciculare* e *Coriolus versicolor*, *Flammulina velupites*, *Stereum hirsutum*, *Coriolus versicolor*, *Dichomitus squalens*, *Hypholoma fasciculare* e *Auricularia auricula* que demonstram ter uma forte aceleração da degradação desses compostos (WATANABE et al., 2000).

3. Metodologia

Trata-se de uma revisão de integrativa de literatura (RI). A revisão da literatura é indispensável não somente para definir bem o problema, mas também para obter uma ideia precisa sobre o estado atual dos conhecimentos sobre um dado tema, as suas lacunas e a contribuição da investigação para o desenvolvimento do conhecimento (BENTO, 2012).

Levando em conta o objetivo do estudo, foi levantado o seguinte questionamento: quais são as principais tecnologias em biorremediação utilizados na descontaminação de solos contaminados por agrotóxicos?

Na segunda etapa, a busca dos estudos foi realizada entre os meses de junho de 2021 e agosto de 2021, em 3 bases de dados: LILACS (Literatura Latino-americana e do Caribe em Ciências da Saúde), PubMed (Central: PMC- National Library of Medicine National Institutes of Health) e ScienceDirect. A busca de artigos foi realizada através dos termos: “*bioremediation*” and “*decontamination*” and “*pesticides*”, junto ao operador booleano *and*.



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 16 a 18 de novembro de 2021

Para o desenvolvimento da pesquisa foram aplicados os seguintes critérios de inclusão: artigos publicados entre 2016 a 2021, em qualquer idioma, que estivessem disponíveis na íntegra e que respondessem o objetivo do estudo. Os critérios de exclusão foram: artigos repetidos, artigos incompletos, resumos de trabalhos, trabalhos publicados em anais de eventos, resenhas de livros e artigos que não respondiam o questionamento da RI.

A princípio, os trabalhos foram selecionados com base no título e resumo. Em seguida, foi feita a leitura completa dos textos, para averiguar se os trabalhos respondiam à pergunta norteadora.

4. Resultados

No levantamento bibliográfico foram obtidos 1.317 artigos. Desses coletados 12 foram coletados na LILACS, 1.277 na Science Direct e 38 na PubMed. Após a leitura de títulos e resumos 87 artigos foram selecionados para a próxima etapa. Todavia foram removidos 2 artigos por apresentarem duplicação. Sendo assim, 85 trabalhos foram lidos minuciosamente na íntegra, onde 16 responderam os objetivos do estudo e foram incluídos na amostra final da revisão. Enquanto aos anos de publicações dos trabalhos, houve uma predominância de artigos publicados no ano de 2021. 2020, 2017 e 2016 foram os anos com menor número de publicações, seguidos de 2018 e 2019 com nenhuma publicação. Os passos para realização do estudo estão descritos na figura 4.

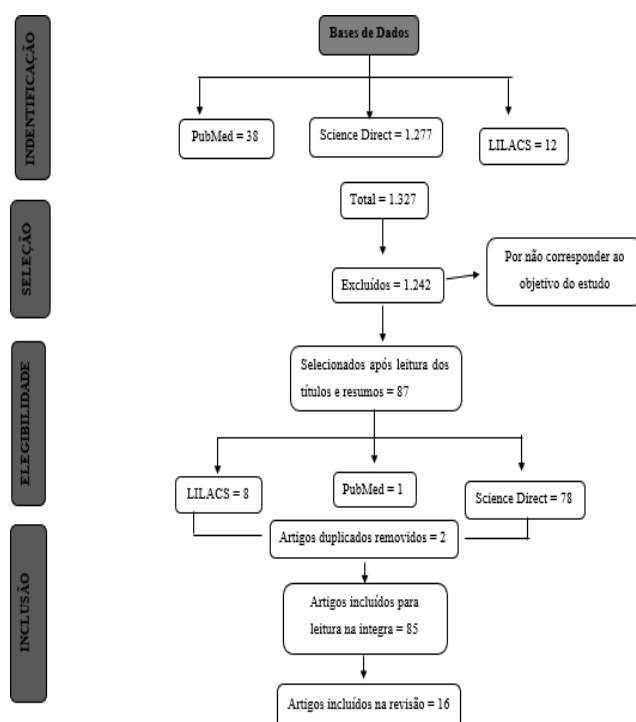


Figura 4: Fluxograma de seleção dos trabalhos que integram a amostra

Fonte: Própria, 2021.



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 16 a 18 de novembro de 2021

Tabela 01- Caracterização dos estudos incluídos na RI.

Autor, ano	Tipo de estudo	Periódico	Contaminante	Biorremediador
2021				
Pedroso Monteiro <i>et al.</i> , 2021	Artigo de Pesquisa	EFB Bioeconomy Journal	Organofosforados	Nanopartículas magnéticas
Sarker Aniruddha <i>et al.</i> , 2021	Artigo de Revisão	Environmental Technology & Innovation	NR	Enzimas catalíticas: lacase e peroxidase
Fdez-Sanromán Antía <i>et al.</i> , 2021	Artigo de revisão	Current Opinion in Electrochemistry	Contaminantes orgânicos	Lavagem eletrocinética do solo
Zhao Sumao <i>et al.</i> , 2021	Artigo de Pesquisa	Bioresource Technology	Organofosforados	<i>Azohydromonas australica</i>
Urionabarreneitea Erik <i>et al.</i> , 2021	Artigo de Pesquisa	Science of The Total Environment	Dieldrin	Plantas + bactérias + minhocas
Nurzhanova, Asil <i>et al.</i> , 2021	Artigo de Pesquisa	International Journal of Phytoremediation	Diclorodifeniltricloroetano	<i>Bacillus vallismortis e Bacillus aryabhatai</i>
2020				
Morillo, E. <i>et al.</i> , 2020	Artigo de Pesquisa	International Journal of Pharmaceutics	NR	Ciclodextrinas
A.Saleh Iman <i>et al.</i> , 2020	Artigo de Revisão	Environmental Technology & Innovation	Organoclorados	Limalha de ferro
Santillan, J Y <i>et al.</i> , 2020	Artigo de Pesquisa	Biodegradation	Organofosforados (metil paraoxon, metilparati on e clorpirifós)	<i>Streptomyces phaeochromogenes, Streptomyces setonii e Arthrobacter oxydans</i>
Ahmad Shahzad Khuram, 2020	Artigo de Pesquisa	Folia Microbio	Organoclorado endossulfan	<i>Bacillus subtilis, Aspergillus niger, Aspergillus flavus e Penicillium chrysogenum</i>
2019				
2018				
2017				
Alvarez Analía <i>et al.</i> , 2017	Artigo de revisão	Chemosphere	NR	Actinobactérias
Villaverde, J <i>et al.</i> , 2017	Artigo de Pesquisa	Chemosphere	Feniluréia diuron	Consórcios microbiano isolados
Cecchin Iziqiel <i>et al.</i> , 2017	Artigo de Pesquisa	International Biodeterioration & Biodegradation	Organoclorados	Nanopartículas de ferro
Su Fu-Hsiang <i>et al.</i> , 2017	Artigo de Pesquisa	Chemical Engineering Journal	Organofosforado	Hidrolase de ligação de celulose
Lizano-Fallas Verónica <i>et al.</i> , 2017	Artigo de Pesquisa	Chemosphere	Triazínicos (atrazina / terbutilazina / terbutryn) e (clorpirifós)	<i>Trametes versicolor</i>
2016				
Javaid, Muhamma Kashif <i>et al.</i> , 2016	Artigo de Revisão	Scientifica	Carbendazim	<i>Sphingobium japonicum</i>

Fonte: Dados da pesquisa (*NR-Não Relatado)



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

Uma variedade de organismos está envolvida na degradação de pesticidas e o resultado tem sido um sucesso. A classe de toxicidade de pesticidas dada pela OMS, na qual os pesticidas foram classificados em três classes que representam seu potencial perigoso, também foram degradados pelos microrganismos (SARKER *et al.*, 2021; MORILLO *et al.*, 2020; SALEH *et al.*, 2020). Observou-se que os principais pesticidas que contaminam o solo são da classe dos organofosforados e organoclorados, e apesar de serem contaminantes de alto nível de toxicidade, bactérias como *Streptomyces phaerchromogenes*, *Streptomyces setonii*, *Nocardia corynebacterioides*, *Nocardia asteroides* e *Artrobacter axydans*, (SANTILLAN *et al.*, 2020), além da bactéria *Azohydromonas australica* (ZHAO, 2021) que atuam como biorremediadores eficientes contra essas classes de pesticidas.

Apesar das novas tecnologias aplicadas para biorremediação como: nanopartículas de ferro (CECCHIN *et al.*, 2017); hidrolase de ligação de celulose (SU *et al.*, 2017); associação de plantas, bactérias e minhocas (URIONABARRENETXEA *et al.*, 2021); nanopartículas magnéticas (PEDROSO *et al.*, 2021) e lavagem eletrocinética do solo (FDEZ-SANROMÁN *et al.*, 2021), as principais tecnologias para biorremediação no solo está voltado ao uso de microrganismo vivos, uso de bactérias, fungos e enzimas principalmente.

Estudos de Ahmad (2017) mostrou que o uso de *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* e *Penicillium chrysogenum*, atuam como biorremediador eficaz contra o pesticida organoclorado endossulfan, comumente usado em lavouras de café e soja e classificado como extremamente tóxico a saúde humana, animal e ao meio ambiente. Estudos de Lizano *et al.* (2017), Villaverde *et al.* (2017) e Javaid *et al.* (2016) utilizando *Trametes versicolor*, consórcios microbiano isolados e *Sphingobium japonicum*, demonstram eficiência alta contra os pesticidas triazínicos, feniluréia diuron e carbendazim, respectivamente. Autores relatam o uso de bactérias gram-positivas, filamentosas, aeróbias, com predominância no solo (Actinobactérias) (ALVAREZ *et al.*, 2017) e *Bacillus vallismortis* e *Bacillus abhattai* para degradação de diclorodifeniltricloroetano (NURZHANOVA *et al.*, 2021). Consequentemente, o processo de biorremediação foi acelerado pelo uso de tais organismo. Muitas são as tecnologias aplicadas para degradação de pesticidas no solo.

1.1 5. Conclusões

Após a análise dos resultados desta RI, foi possível comprovar que as técnicas de biorremediação demonstram uma alternativa viável na descontaminação de solos poluídos por pesticidas, apresentando, na maioria das vezes, baixo custo de implementação, e menor risco ambiental do que técnicas de limpeza que envolvem processos físicos e químicos. Um resumo desses achados na presente revisão indicou que diversos gêneros de fungos, bactérias e enzimas estão envolvidos na biodegradação de diferentes pesticidas.

A biodegradação dos pesticidas não parece ser conservada para nenhum gênero ou espécie específica. Quanto aos poluentes, quando necessária, a retirada dos agrotóxicos deve levar em consideração as características químicas e toxicológicas dos compostos, sem descumprir a legislação. Para tanto, deve-se destacar que vários países ainda carecem de atos legislativos, sendo este o principal inconveniente quando áreas poluídas devem ser remediadas.



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

1.2 6. Agradecimentos

Universidade Estadual do Ceará (UECE).

1.3 7. Referências bibliográficas

- ABRASCO, Parecer Técnico sobre processo de reavaliação do ingrediente ativo de agrotóxico glifosato utilizado na agricultura e como produto domissanitário. Associação Brasileira de Saúde Coletiva, Grupo Temático Saúde e Ambiente, 20/06/2019.
- ALVAREZ, Analia et al. Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals. **Chemosphere**, v. 166, p. 41-62, 2017.
- AHMAD, Khuram Shahzad. Remedial potential of bacterial and fungal strains (*Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* and *Penicillium chrysogenum*) against organochlorine insecticide Endosulfan. **Folia microbiologica**, v. 65, n. 5, p. 801-810, 2020.
- ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Listas de ingredientes ativos com uso autorizado e banidos no Brasil. Anvisa, 20 jan. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2WD8grj>>.
- BENTO, António. Como fazer uma revisão da literatura: Considerações teóricas e práticas. **Revista JA (Associação Académica da Universidade da Madeira)**, v. 7, n. 65, p. 42-44, 2012.
- CECCHIN, Iziqiel et al. Nanobioremediation: Integration of nanoparticles and bioremediation for sustainable remediation of chlorinated organic contaminants in soils. **International Biodegradation & Biodegradation**, v. 119, p. 419-428, 2017.
- COSTA, Marcus AG; COSTA, E. C. Poluição ambiental: herança para gerações futuras. **Santa Maria: Orium**, 2004.
- COUTINHO, P. W. R. Alternativas de remediação e descontaminação de solos – Biorremediação e Fitorremediação. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 59-68, abr. 2015.
- DE SOUZA, Luís Henrique Nunes; ARRUDA, Regina de Oliveira Moraes. Revitalização de corpos d'água com o uso da biorremediação. **Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada-UNG-Ser**, v. 4, n. 1, p. 37-45, 2021
- FAO – UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS, 2021 <<http://www.fao.org/faostat/en/?#data/EP/visualize>> (acesso em agosto de 2021)
- FDEZ-SANROMÁN, Antía et al. Prospects on integrated electrokinetic systems for the decontamination of soil polluted by organic contaminants. **Current Opinion in Electrochemistry**, p. 100692, 2021.
- FRANCISCO, Wellington Camilo; QUEIROZ, Tânia Márcia de. Biorremediação. **Nucleus**, v. 15, n. 1, p. 249, 2018.
- Global MRL Database. Agricultural Commodities Pesticide MRLs. Available online: <http://www.mrlatabase.com/> (accessed on 19 August 2021).
- GILSON, Italo Kael et al. Agrotóxicos liberados nos anos de 2019-2020: Uma discussão sobre a uso e a classificação toxicológica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 49468-49479, 2020.



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

GREEN, Cynthia; HOFFNAGLE, Ana. Phytoremediation field studies database for chlorinated solvents, pesticides, explosives, and metals. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2004.

GRISOLIA, Cesar Koppe. Agrotóxicos: mutações, reprodução & câncer; riscos ao homem e ao meio ambiente, pela avaliação de genotoxicidade, carcinogenicidade e efeitos sobre a reprodução. **Ed. UnB**, 2005

HORNE, I. et al. Functional effects of amino acid substitutions within the large binding pocket of the phosphotriesterase OpdA from *Agrobacterium* sp. P230. **FEMS Microbiology Letters**, 259(2):187-194, 2006.

JAVAID, Muhammad Kashif; ASHIQ, Mehrban; TAHIR, Muhammad. Potential of biological agents in decontamination of agricultural soil. **Scientifica**, v. 2016, 2016.

KARIGAR, Chandrakant S.; RAO, Shwetha S. Role of microbial enzymes in the bioremediation of pollutants: a review. **Enzyme research**, v. 2011, 2011.

KERBER, Sheila Simone et al. Prospecção de bactérias com potencial na biorremediação de áreas contaminadas com BTX (benzeno, tolueno e xileno). 2020.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G.; DURÁN, N.; Novas Tendências nos tratamentos de Efluentes Têxteis. **Química Nova**, V.25, n.1, p.78-82, 2002.

LEVOB JÁ, ENGEL LS, Richardson D, HOGAN SL, Sandler DP, Hoppin JA. Pesticide exposure and end-stage renal disease risk among wives of pesticide applicators in the Agricultural Health Study. 2015; 143:1- 29

LIZANO-FALLAS, Verónica et al. Removal of pesticides and ecotoxicological changes during the simultaneous treatment of triazines and chlorpyrifos in biomixtures. **Chemosphere**, v. 182, p. 106-113, 2017.

MILHOME, Maria Aparecida Liberato et al. Diagnóstico da contaminação do solo por metais tóxicos provenientes de resíduos sólidos urbanos e a influência da matéria orgânica. 2018.

MORILLO, E. et al. Soil bioremediation by cyclodextrins. A review. **International Journal of Pharmaceutics**, p. 119943, 2020.

MUTECA, F. L. L.; Biorremediação de solo contaminado com óleo cru proveniente de Angola. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: < <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/biorremediacao-de-solocontaminado-com-oleo-cru.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2021

NURZHANOVA, Asil et al. Optimization of microbial assisted phytoremediation of soils contaminated with pesticides. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 5, p. 482-491, 2021.

PAN CONSOLIDATED list of banned pesticides. Pesticide Action Network International, 2018. Disponível em: < <https://bit.ly/2g5P1Tu>>. Acesso < julho de 2021>.



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
 VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
 16 a 18 de novembro de 2021

PEDROSO, Marcelo Monteiro et al. Pesticide degradation by immobilised metalloenzymes provides an attractive avenue for bioremediation. **EFB Bioeconomy Journal**, v. 1, p. 100015, 2021.

PEREIRA, A, R, B; DE FREITAS, D, A, F. Uso de micro-organismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 6, p. 975 – 1006. 2012.

RAO, M.A et al. Role of enzymes in the remediation of polluted environments **J. Soil Sci. Plant Nutr.**, Temuco, v.10, n.3, p.333-353, jul. 2010. Disponível em < <https://bit.ly/3zcSCXA> >. acessado em 21 agosto 2021.

RIBAS, Priscila Pauly; MATSUMURA, Aida Terezinha Santos. A química dos agrotóxicos: impacto sobre a saúde e meio ambiente. **Revista Liberato**, v. 10, n. 14, p. 149-158, 2009.

SAJANA, T. K.; GHANGREKAR, M. M.; MITRA, A. In situ bioremediation using sediment microbial fuel cell. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 21, n. 2, p. 04016022, 2017.

SALEH, Imane A.; ZOUARI, Nabil; AL-GHOUTI, Mohammad A. Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches. **Environmental Technology & Innovation**, p. 101026, 2020.

SANTILLAN, J. Y. et al. Microbial degradation of organophosphorus pesticides using whole cells and enzyme extracts. **Biodegradation**, v. 31, n. 4, p. 423-433, 2020.

SARKER, Aniruddha et al. Remediation of chemical pesticides from contaminated sites through potential microorganisms and their functional enzymes: Prospects and challenges. **Environmental Technology & Innovation**, p. 101777, 2021.

SILVEIRA, Brenno Dayano Azevedo da. Recuperação de solo contaminado com petróleo pela técnica da bioestimulação. 2016.

SU, Fu-Hsiang et al. Decorating outer membrane vesicles with organophosphorus hydrolase and cellulose binding domain for organophosphate pesticide degradation. **Chemical Engineering Journal**, v. 308, p. 1-7, 2017.

UETA, J.; PEREIRA, N. L.; SHUHAMA, I. K.; CERDEIRA, A. L. Biodegradação de herbicidas e biorremediação: microrganismos degradadores do herbicida atrazina. **Biotecnologia**, Brasília, v. 10, p. 10-13, 1999.

URIONABARRENETXEA, Erik et al. Application of in situ bioremediation strategies in soils amended with sewage sludges. **Science of The Total Environment**, v. 766, p. 144099, 2021.

VILLAVARDE, J. et al. Combined use of microbial consortia isolated from different agricultural soils and cyclodextrin as a bioremediation technique for herbicide contaminated soils. **Chemosphere**, v. 193, p. 118-125, 2017.

WATANABE, Kazuya et al. Molecular characterization of bacterial populations in petroleum-contaminated groundwater discharged from underground crude oil storage cavities. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 66, n. 11, p. 4803-4809, 2000



III *Sustentare* – Seminários de Sustentabilidade da PUC-Campinas
VI WIPIS – Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade
16 a 18 de novembro de 2021

WHO - World Health Organization. Health Topics: Pesticides. Available online: <http://www.who.int/topics/pesticides/en/> (accessed on 20 August 2021).

ZHAO, Sumao et al. In-depth biochemical identification of a novel methyl parathion hydrolase from *Azohydromonas australica* and its high effectiveness in the degradation of various organophosphorus pesticides. **Bioresource Technology**, v. 323, p. 124641, 2021.