



Universidade de Brasília

Faculdade Agronomia e Medicina Veterinária

Departamento de Gestão de Agronegócio

**ESTADO DA ARTE DE FITORREMEDIAÇÃO, UMA  
REVISÃO ENTRE 2010-2020 COM FOCO EM SÍTIOS DE  
MINERAÇÃO DE SUPERFÍCIE ABANDONADOS**

PEDRO CALEFFI BARBOSA – 17/0153827

**Orientadora:**

Dra. Maísa Santos Joaquim

Brasília – DF, 2021

Pedro Caleffi Barbosa – 17/0153827

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito para graduação no curso de  
Gestão de Agronegócio.

Professora Orientadora: Dra. Maísa Santos  
Joaquim.

Brasília – DF

Ano 2021

## RESUMO

Tendo sua importância ressaltada desde o século XX, a questão ambiental de poluição, contaminação e degradação do meio ambiente em que nós, seres humanos, habitamos tem sido amplamente estudada e combatida. Este estado da arte vem como um meio de apresentação e verificação dos avanços da década de 2010 de um conjunto de técnicas já conhecido pela comunidade científica mundial desde a década de 1990, a fitorremediação. Neste estudo foram verificados diversos títulos envolvendo o conjunto de técnicas entre 10 diferentes bibliotecas ou bases de dados e seus principais títulos apresentados. Foi reportado desde teorias que explicam a evolução de organismos hiperacumuladores utilizados na técnica até o sequenciamento de determinados genes que amplificam as capacidades fitorremediativas dos micro/organismos envolvidos e a busca pela existência de um modelo de crescimento dos microrganismos simbióticos rizosféricos que auxiliam no funcionamento da técnica. Foi verificado como o conjunto de técnicas denominado fitorremediação tem apresentado quantidade de publicações/ano crescentes e é muito defendido como uma técnica de remediação de solos contaminados devido à sua metodologia considerada “ecologicamente amigável”.

Palavras-chave: Fitorremediação, Solos Contaminados, Estado da Arte, Remediação de Solo.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Publicações por palavra-chave durante a década de 2010-2020.....	48
Gráfico 2 – Total de publicações por ano somadas.....	48
Gráfico 3 – Quantidade de títulos por base de dados pesquisada.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - número de títulos/ano/palavra-chave - CAPES – 1.....	14
Tabela 2 - número de títulos/ano/palavra-chave - CAPES – 2.....	14
Tabela 3 - número de títulos/ano/palavra-chave – Google Acadêmico - 1.....	15
Tabela 4 - número de títulos/ano/palavra-chave – Google Acadêmico - 2.....	15
Tabela 5 - número de títulos/ano/palavra-chave – SciElo - 1.....	16
Tabela 6 - número de títulos/ano/palavra-chave – SciElo - 2.....	16
Tabela 7 - número de títulos/ano/palavra-chave – Biblioteca Central da Universidade de Brasília - 1.....	17
Tabela 8 - número de títulos/ano/palavra-chave – Biblioteca Central da Universidade de Brasília - 2.....	17
Tabela 9 - número de títulos/palavra-chave com quantidades de títulos/base de dados – <i>National Center for Biotechnology Information</i> - 1.....	18
Tabela 10 - número de títulos/ano/palavra-chave – <i>National Library of Medicine</i> - 1.....	20
Tabela 11 - número de títulos/ano/palavra-chave – Scopus – 1.....	20
Tabela 12 - número de títulos/ano/palavra-chave – Scopus – 2.....	21
Tabela 13 - número de títulos totais/palavra-chave demonstrando as últimas publicações do último semestre, trimestre e mês – Springer – 1.....	21
Tabela 14 - número de títulos/ano/palavra-chave – <i>Publons</i> - 1.....	24
Tabela 15 - número de títulos/ano/palavra-chave – <i>Publons</i> - 2.....	24
Tabela 16 - número de títulos/mês/ano para <i>phytoextraction</i> – <i>Publons</i> – 1.....	64

Tabela 17 - número de títulos/mês/ano para <i>phytoremediation</i> – <i>Publons</i> – 2.....	64
Tabela 18 - número de títulos/ano/palavra-chave – <i>Web of Science</i> - 1.....	26
Tabela 19 - número total de títulos/ano/palavra-chave – Português.....	50
Tabela 20 - número total de títulos/ano/palavra-chave – Inglês.....	50
Tabela 21 - número de títulos somados/ano/palavras-chave – Total.....	50
Tabela 22 - número de títulos/ano/base de dados pesquisada.....	51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais autores referenciados.....	13
Quadro 2 – Categorização da quantidade de títulos/palavra-chave/fonte – NCBI.....	18
Quadro 3 - Títulos Springer por menção de assuntos.....	23
Quadro 4 - Impacto de ingestão de elementos poluentes na saúde humana.....	28
Quadro 5 - Resumo das diferentes técnicas de fitorremediação.....	30
Quadro 6 - Sumário das diferentes técnicas de fitorremediação.....	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os mecanismos de absorção de metais pesados por plantas através de tecnologia fitorremediativa.....	43
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WBGU - *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen*  
 ATSDR - *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*  
 FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*  
 CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
 CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
 WoS – *Web of Science*  
 PGPR – *Plant growth-promoting rhizobacteria*  
 m<sup>3</sup> – Metros cúbicos  
 Fe – Ferro  
 Mn - Manganês  
 Zn - Zinco  
 Cu - Cobre  
 Pb - Chumbo

Cr - Cromo  
Sn - Estanho  
Mo - Molibdênio  
Ni - Níquel  
Co – Cobalto  
S – Enxofre  
Ha – hectares  
CO2 – Gás Carbônico  
Hg – Mercúrio  
As – Arsênio  
Mg – Miligrama  
Kg – Quilograma  
Ag – Prata  
V - Vanádio

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	4
2	MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA	4
2.1	Especificidades de cada ferramenta de pesquisa utilizada	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Poluição e contaminação do solo e seus efeitos adversos	19
3.2	Fitorremediação, um meio de descontaminação do solo	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Fitorremediação e suas técnicas	26
4.2	Algumas espécies de plantas utilizadas na fitorremediação durante 2010-2020	30
4.3	PGPR e fitorremediação	31
4.4	Fitorremediação de elementos específicos	35
4.5	Outros pontos observados a respeito da fitorremediação durante a pesquisa	37
4.6	Resultados gerais obtidos	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6	RECOMENDAÇÕES	48
7	REFERÊNCIAS	49
8	ANEXOS	57

# 1 INTRODUÇÃO

Tendo sua primeira descoberta em 1976, *Sebertia acuminata* foi a primeira de muitas plantas definidas como superacumuladoras, possuindo uma capacidade única na biologia de acumular quantidades maiores de metais pesados quando comparados com outros organismos. Desde então a comunidade científica vem atribuindo diferentes funções a estes organismos por sua funcionalidade e, também, necessidade do seu desenvolvimento como fitorremediador, destinado a sustentabilidade e reparação ambiental (SALT *et al.*, 1995),

Desde a antiguidade o homem pré-histórico extrai gêneros da natureza para utilizá-los como ferramenta ou consumi-los. Um dos meios de extração de determinados gêneros é a mineração, tendo achados de até 40.000 (primeiro sítio de mineração subterrânea) anos de idade (UNESCO, 2008), entre muitos sítios, diversos deles mantendo suas atividades até a atualidade.

A atividade extrativista mineradora pode ocorrer de três maneiras diferentes: mineração de superfície, subterrânea e *in situ*. Todas as variações da atividade geram uma grande quantidade de resíduo material (frequentemente ácido) e emissões de partículas na atmosfera causando preocupações ambientais e de saúde (CHATTOPADHYAY & CHATTOPADHYAY, 2013).

Os impactos causados pelas atividades mineradoras são evidentes, trazendo preocupações ambientais e, a partir da década de 1990, passou-se ainda mais a buscar meios sustentáveis de remediar os danos causados pela atividade. O uso de superacumuladores para fitorremediação do local se encaixa neste ponto, se apresentando como uma opção financeiramente e ecologicamente viável.

No século XXI, estudos de Arunakumara *et al.*, 2013; Adokpayi *et al.*, 2014; Fernández-Cadena *et al.*, 2014; Abraham *et al.*, 2017 e Lazo *et al.*, 2018 apresentam exemplos de como há contaminação de metais pesados em solos, rios, mangues ou musgos em diversas regiões do planeta representando um risco crescente a biosfera local, ou próxima. Além de apresentar potenciais riscos de saúde a humanidade verificando, assim, a necessidade de remediação mais urgente nas situações em que existem maiores riscos de contaminação.

Desde a criação da Agenda 21, resultado da Conferência Eco-92(ou Rio-92) realizada em 1992, 179 países assinaram seus compromentimentos com o planejamento na construção de sociedades sustentáveis, inferindo em métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica. Dentre as maneiras de proteção ambiental que possuem sua importância justificada desde o século XX, será foco tal proteção em sítios de mineração de superfície. Lottermoser (2015) já traz como a proteção da atividade de alto impacto que é a mineração busca, como

opção mais favorável, prevenir a formação de resíduos de mineração e evitar perturbação na reabilitação de sítios de mineração que cessaram suas atividades, contudo, nem sempre é possível realizar a proteção ambiental nos locais onde tais atividades são exercidas, havendo então outras opções que buscam a reparação dos danos causados.

Os resíduos gerados por atividade mineradora apresentam riscos para o meio ambiente e seus impactos dependem no que está sendo minerado, como e onde está ocorrendo a atividade. Em geral, o resíduo contém sulfetos geradores de ácidos, metais pesados e outros contaminantes, sendo geralmente armazenado na superfície em grandes pilhas de drenagem livre. Tais resíduos podem vir a causar poluição do ar (através de ventos que transportam partículas contaminadoras do solo para outros locais), da água (ocorrendo a lixiviação a partir da chuva, ocasionando contaminação de lençóis freáticos) e visual (sendo uma área estéril onde não há biodiversidade de fauna e flora, apenas aglomerados de solo/rochas/resíduos). (CHATTOPADHYAY & CHATTOPADHYAY, 2013)

Até 1994, segundo o WBGU (em alemão, *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen*), haveriam quase 2.000 milhões de hectares de terra demonstrando, pelo menos, algum sinal de degradação e, destes, 300 milhões de hectares de superfície terrestre já estariam seriamente degradados e 22 milhões de hectares estariam contaminados.

Após alguns anos, outra estimativa de degradação de solos já apontava entre um e seis bilhões de hectares de terra degradados ao redor do planeta (GIBBS & SALMON, 2015), assim se volta para a questão de reparação de solos degradados e, conseqüentemente, inutilizáveis para diversas atividades produtivas. Apenas na China, especialistas estimavam que haviam entre 300.000 e 600.000 sítios industriais contaminados (JING, 2011). No Brasil, apenas no Rio de Janeiro, 141 áreas do Estado estão contaminadas por resíduos industriais e, segundo a Secretaria do Meio Ambiente, mais de 600 outras áreas teriam fortes indícios de contaminação (G1, 2013). Na Polônia, no período de 1984-2000, foi estimado que cerca de 900 milhões m<sup>3</sup> de resíduos provenientes de atividade de mineração e metalurgia foram despejados na Bacia de Carvão da Alta Silésia, suficiente para contaminar 133 milhões de m<sup>3</sup> de água (RYBICKA, 1996).

Para mineração de minério de ferro, atividade de interesse econômico brasileiro, Banerjee *et al.* (2018) traz como foi observado conteúdo dos resíduos produzidos por tais atividades com maiores concentrações de Fe, Mn, Zn e Cu (Tailândia e Índia), Pb, Cu, Zn e Mn (Mongólia) além de Cr, Sn, Mo, Ni e Co quando comparado com solo “saudável”. Assim sendo, é uma grande fonte de metais pesados poluentes, sendo dispersados pelo vento ou água para os

ecossistemas de solos, vegetações e águas, destruindo assim a biodiversidade. Além de tais fatores, os resíduos carecem estruturas de solo contendo baixo nível de matéria orgânica e micronutrientes, sendo assim, inférteis. (BANERJEE *et al.*, 2018)

A respeito da contaminação de solo por atividades mineradoras, Benidire *et al.* (2020) traz a respeito da contaminação de 8 áreas de diferentes mineradoras influenciando cerca de 753ha de terra com contaminantes variando entre Fe, S, Pb, Zn, Cr e Cu. Seus impactos no meio ambiente variando desde a modificação do terreno até contaminação do solo e perda de vegetação natural.

A partir de tal e tendo em vista que o solo é um dos principais meios onde os seres vivos habitam – principal meio utilizado pelos seres humanos -, a demanda pelo solo aumenta junto com o crescimento populacional mundial, ele é base para diversos mercados diferentes (como grande parte da agricultura mundial, em plantios de café, soja e trigo, por exemplo) e como se trata de um recurso limitado, infere-se como prioridade a reparação de solos degradados e/ou contaminados para possibilidade de manutenção do desenvolvimento da agricultura e assim, manutenção das atividades humanas no planeta.

Desde 2006, quando formalizado pela *Soil Thematic Strategy of the European Union*, cinco ameaças específicas foram identificadas para a saúde de solos: erosão por vento e água, redução de matéria orgânica, compactação, salinização e deslizamentos de solo e rochas. Além destas, o selamento do solo (cobertura permanente do solo por material impermeável) e sua contaminação também foram identificadas como ameaças. (FAO & ITPS, 2015)

Solos apresentam diversas classificações e, segundo a FAO (2006), solos contaminados são aqueles que apresentam potenciais riscos à saúde humana (ATSDR, 2005). Neste trabalho houve foco apenas em solos contaminados pela atividade humana, por metais pesados.

Já existem métodos para a realização de descontaminação de metais pesados em solos (TAVARES, 2013; LIU, 2018), tendo como exemplos os métodos *PUMP and TREAT*, a extração de vapor do solo, a dessorção térmica, a aeração *in situ*, barreiras reativas permeáveis, a incineração, solidificação/estabilização, a lavagem do solo, a biorremediação e a fitorremediação. O foco deste trabalho foi apenas o último dos métodos citados.

## 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa foi apresentar um panorama geral dos estudos da década de 2010 a 2020 a partir de um estado da arte a respeito da fitorremediação utilizando organismos considerados hiper/superacumuladores verificando a possibilidade e aplicabilidade de seu uso em solos de sítios de mineração de superfície abandonados.

## 2 MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA

O método principal de pesquisa foi a revisão literária e documental, onde se fazem presentes cinco passos: “escanear documentos, fazer notas, estruturar a revisão literária, escrever a revisão e construir a bibliografia.” (ROWLEY & SLACK, 2004)

Buscou-se, por meio desta pesquisa, apresentar, de maneira geral, estudos a respeito de fitorremediação publicados da última década (2010 a 2020), devido a ser o período de 10 anos mais recente finalizado e não havendo mais publicações novas em tal período durante a realização deste trabalho (2021), sendo assim a década mais recente e atualizada disponível para pesquisa. Tendo em vista a pandemia dos anos de 2020 e 2021, houve prioridade em estudos disponíveis em meios eletrônicos, devido a situação de segurança e saúde em vigor. A busca pretendeu fazer uso e contabilizar os estudos com algum impacto na comunidade científica mundial, inferiu-se então, na pesquisa em meios eletrônicos de algumas das principais bases de dados utilizadas na atualidade.

Foram realizadas buscas por material dentro das plataformas eletrônicas CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php?>), Google Acadêmico (disponível em: <https://scholar.google.com.br/>), SciELO (disponível em: <https://www.scielo.org/>), na Biblioteca Central da Universidade de Brasília (disponível em: <https://bce.unb.br/>), *National Center of Biotechnology Information* (disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) para dados quantitativos, aprofundando na *National Library of Medicine* (disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), SCOPUS (disponível em: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>), SPRINGER (disponível em: <https://www.springer.com/gp>), Publons (disponível em: [https://publons.com/publon/?order\\_by=date](https://publons.com/publon/?order_by=date)) e *Web of Science* (disponível a partir da

plataforma CAPES) envolvendo as palavras-chave: fitoextração, fitofiltração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, rhizodegradação, fitodesalinização, superacumuladores, hyperacumuladores e fitorremediação. A busca foi realizada utilizando tanto as palavras mencionadas como sua versão traduzida para o inglês: *phytoextraction*, *phytofiltration*, *phytostabilization*, *phytovolatilization*, *phytodegradation*, *rhizodegradation*, *phytodesalination*, *superaccumulators*, *phytoremediation* e *hyperaccumulators*. O período de tempo revisado foi a partir de janeiro de 2010 até dezembro de 2020 para tal pesquisa, com exceções de materiais considerados essenciais para realização da revisão teórica.

Foram analisados artigos, livros, revistas acadêmicas, dissertações/teses, materiais de conferência, resumos, cartas e publicações para avaliação de validade e uso neste trabalho. A avaliação realizada foi uma verificação se o documento revisado tinha relação suficiente com o tema proposto, sendo escaneado em busca de citação ou referência ao tema além de apresentar citações suficientes para ser revisado. Os documentos foram escaneados em busca de títulos, subtítulos ou algumas citações a respeito do assunto pesquisado, verificando a existência e frequência de alguma das palavras-chave citadas anteriormente. Foram selecionados os estudos de maior impacto devido à quantidade de estudos publicados no período de tempo pesquisado, caso contrário este trabalho não seria finalizado no tempo disponível para sua realização.

Os estudos mais relevantes encontrados foram apresentados, classificados e quantificados entre: fitorremediação e suas técnicas, algumas espécies específicas de plantas utilizadas em processo fitorremediativo, PGPR e fitorremediação, alguns elementos que foram fitorremediados com sucesso e outros pontos ressaltados da fitorremediação ao longo da pesquisa, seguido pela apresentação dos principais trabalhos encontrados e ao final, uma análise geral e apresentação dos dados coletados como um todo.

Foi realizada uma análise quanti-qualitativa dos dados obtidos apresentando como resultado a situação que se encontram os estudos da área e sua evolução nos anos pesquisados. Foi realizada a divisão da apresentação dos resultados de acordo com a base de dados, que teve uma breve apresentação, e principais títulos encontrados. Já se ressalta como foi esperado encontrar títulos repetidos nas diferentes bases de dados (por exemplo, um mesmo trabalho pode aparecer tanto no Google Acadêmico quanto na CAPES e na Publons), tal situação foi mencionada, porém os trabalhos mais relevantes ou mais citados sendo apresentados com profundidade apenas uma vez. Esperou-se encontrar a maior quantidade de títulos com as palavras-chave “fitorremediação” e “*phytoremediation*”, tendo em vista que são os pontos de partida para as outras palavras-chave.

A quantidade de trabalhos apresentados sobre fitorremediação pelas bases de dados ultrapassava 30.000 documentos apenas no google acadêmico, o que inviabilizou a possibilidade de análise completa de toda a bibliografia disponível tendo em vista o tempo limitado da produção deste trabalho. Assim sendo, foram revisados de maneira mais completa os documentos que apresentaram uma quantidade próxima, igual ou superior a 1.000 citações verificadas dentro da plataforma que disponibilizou determinado título. Algumas das plataformas não disponibilizam a quantidade de citações dos trabalhos, situação em que foram revisados os primeiros 3 títulos ordenados por relevância dentro de tal plataforma ou que apresentaram título ligado a fitorremediação de solo ou de metais pesados.

O estudo utilizado como base da revisão bibliográfica deste trabalho foi o artigo *Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications*, escrito por Hazrat Ali, Ezzat Khan e Muhammad Anwar Sajad (2013), disponível na bibliografia, tendo em vista a proximidade dos assuntos abordados. Dentre o principal utilizado como referência do estudo se ressalta: base teórica a respeito de metais pesados e seus efeitos no solo e ambiente, as técnicas e estratégias da fitorremediação, a respeito da biodisponibilidade de metais no solo e os diferentes tipos de plantas que sobrevivem em solos com altas quantidades de metais pesados, as limitações da fitorremediação e algumas conclusões do estudo. Comenta-se como foi utilizado como base teórica adicionado a outros trabalhos, buscando um melhor entendimento e apresentação da tecnologia da área.

**Quadro 1.** Principais autores referenciados

Autor(es)	Título(s)	Ano
Salt <i>et al.</i>	<b><i>Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants</i></b>	1995
FAO	<b><i>Soil Degradation e Soil Pollution: a Hidden Reality.</i></b>	2018a e 2018b
FAO & ITPS	<b><i>Status of the Worlds’s Soil Resources</i></b>	2015
ATSDR	<b><i>Public health assessment guidance manual</i></b>	2005
Wei <i>et al.</i>	<b><i>A review on phytoremediation of contaminants in ais water and soil</i></b>	2021
Ali <i>et al.</i>	<b><i>Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications</i></b>	2013

Wani <i>et al.</i>	<i>Engineering plants for heavy metal stress tolerance</i>	2018
--------------------	--	------

Elaborado pelo autor.

## 2.1 Especificidades de cada ferramenta de pesquisa utilizada

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) foi criada em 1951 e, vinculado ao Ministério da Educação, tem a finalidade de “subsidiar a formulação de políticas e no desenvolvimento de atividade de suporte à formação de profissionais de magistério para a educação básica e superior e para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil” (Lei 8.405/92 e Decreto 8.977/2017). O Portal permitiu buscas por assunto, periódico, livro ou base e demonstrou o tipo de recurso do título (artigo, artigo de jornal, recursos textuais, resenha, entre outros), os diferentes tópicos encontrados com o assunto pesquisado, os diferentes autores, a opção de delimitar os anos da pesquisa, a coleção em que o título se encontra (Elsevier, *Web of Science*, GALE, entre outros), o idioma dos títulos e suas quantidades, e o título do periódico (*Chemosphere*, *Bioresource Technology*, *Ecological Engineering*, entre outros).

As pesquisas realizadas em tal base foram refinadas por ano e considerando todos os títulos disponíveis. Pesquisou-se a década de 2010 a 2020 e cada ano individualmente para todas as palavras-chave definidas anteriormente (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 - número de títulos/ano/palavra-chave - CAPES - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década		
fitoextração	7	5	2	5	4	6	6	6	4	1	1	47			47
fitofiltração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
fitoestabilização	4	6	2	1	3	3	3	4	10	0	0	36			37
fitovolatilização	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			1
fitodegradação	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2			2
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
fitodesalinização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
fitorremediação	24	17	17	14	10	13	18	22	11	10	5	161			156
superacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0
total	37	28	21	20	18	22	27	32	25	11	6				

Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - número de títulos/ano/palavra-chave - CAPES - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década		
phytoextraction	316	328	535	520	628	640	461	476	601	548	478	5531			5474
phytofiltration	7	14	22	11	21	24	10	21	23	18	20	191			189
phytostabilization	69	113	165	174	245	231	193	228	242	228	232	2120			2090
phytovolatilization	11	16	18	22	29	34	30	27	29	30	44	290			289
phytodegradation	13	21	30	30	35	42	30	39	29	52	45	366			365
rhizodegradation	11	15	21	24	30	21	32	26	29	28	41	278			276
phytodesalination	5	0	1	1	4	7	8	1	8	8	7	50			49
phytoremediation	997	1040	1468	1776	1741	1870	1572	1580	1957	2021	1868	17890			17717
superaccumulators	1	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	5			5
hyperaccumulators	144	156	198	220	254	558	242	193	281	219	195	2660			2396
total	1574	1703	2458	2778	2987	3430	2578	2591	3199	3153	2930				

Elaborado pelo autor.

Dentre os títulos encontrados a plataforma apresentou com maior relevância os títulos *Phytoremediation* (SAIER JR. & TREVORS, 2010), *Fate of Trace Elements during the Combustion of Phytoremediation Wood* (CHALOT *et al.*, 2012) e *Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants*, Capítulo 12 (KUMAR *et al.*, 2015a). A plataforma da CAPES não disponibilizou a quantidade de citações de cada trabalho.

A plataforma do Google Acadêmico possibilitou pesquisa por palavras-chave assim como sentenças, textos completos, buscas em algumas palavras, excluindo determinadas palavras, por autores ou por editoras, ela incluiu também possibilidades de classificação anual e que o usuário customize os anos que deseja pesquisar. Pôde-se realizar buscas também em citações e em patentes. Os métodos de ordenação encontrados foram por relevância e por data. Nos resultados demonstrados obteve-se o número de vezes que determinada publicação foi citada, assim como o número de versões, ano, sítio eletrônico onde está disponível e autores participantes (apenas em alguns casos foram descritos todos os autores).

A pesquisa realizada na plataforma foi feita individualmente para cada ano e para cada palavra-chave, incluindo uma pesquisa da década. As citações foram contabilizadas também durante as pesquisas o que infere no aumento de títulos disponíveis encontrados (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3 - número de títulos/ano/palavra-chave – Google Acadêmico - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década			
fitoextração	69	61	51	74	90	81	98	99	112	101	67	903		903		
fitofiltração	1	1	4	2	6	5	6	5	4	4	2	40		40		
fitoestabilização	29	47	44	37	60	52	71	56	69	68	47	580		585		
fitovolatilização	16	17	15	16	33	17	32	24	31	31	18	250		250		
fitodegradação	18	20	21	18	31	20	30	24	35	34	25	276		276		
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
fitodesalinização	0	0	0	0	2	1	2	1	2	0	2	10		10		
fitorremediação	190	204	213	259	269	246	318	337	336	370	274	3016		2580		
superacumuladores	0	1	1	0	1	1	0	0	1	2	1	8		8		
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
total	323	351	349	406	492	423	557	546	590	610	436					

Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - número de títulos/ano/palavra-chave – Google Acadêmico - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década			
phytoextraction	1500	1640	1930	2230	2450	2740	2850	3020	3180	3500	4000	29040		22100		
phytofiltration	75	89	94	116	160	152	160	206	165	200	268	1685		1690		
phytostabilization	562	626	766	889	1090	1160	1280	1470	1500	1680	1900	12923		12900		
phytovolatilization	160	174	198	223	277	287	306	382	349	371	528	3255		3270		
phytodegradation	168	204	230	273	302	372	358	449	402	489	552	3799		3810		
rhizodegradation	92	112	138	188	179	200	206	280	252	264	382	2293		2300		
phytodesalination	5	3	9	10	32	25	52	44	48	58	90	376		376		
phytoremediation	4890	5490	6410	7000	7780	8560	9040	9970	10500	12200	14100	95940		34400		
superaccumulators	3	0	3	2	6	12	10	5	6	6	12	65		65		
hyperaccumulators	1640	1770	2020	2410	2390	2590	2570	2790	2980	3290	3750	28200		15400		
total	9095	10108	11798	13341	14666	16098	16832	18616	19382	22058	25582					

Elaborado pelo autor.

A plataforma apresentou os títulos de Glick (2010), Tangahu *et al.* (2011) Ali *et al.* (2013) como tendo as maiores quantidades de citações na década pesquisada, sendo 975, 1370 e 2683 citações, respectivamente.

Dentre as especificações da pesquisa dentro da plataforma SciELO, pôde-se fazer pesquisa por meio de palavra-chave ou sentenças. Foi possível pesquisar em todos os índices, por ano de publicação, autor, financiador, periódico, resumo ou título, estas categorias podendo ser adicionadas para uma pesquisa mais refinada. A ordenação apresentou possibilidade de realização como: mais novos primeiramente, mais antigos primeiro, por relevância, mais citados primeiro ou mais acessados primeiro. Os filtros disponíveis foram por coleção (país), por periódico, por idioma, por ano, áreas temáticas definidas pela SciELO ou pela *Web of Science*, por índice de citação da WoS, se são citáveis ou não e por tipo de literatura. Cada um dos filtros apresentou a quantidade de títulos que tal filtro apresentava dada a pesquisa realizada. Mesmo havendo possibilidade de ordenar os títulos por maior quantidade de citações, não foram encontradas as quantidades de vezes que determinadas publicações foram citadas.

Com base na pesquisa da década (2010 a 2020) a plataforma contabilizou a quantidade de títulos por palavra-chave, disponibilizando os números encontrados nas Tabelas 5 e 6. Dentre os principais títulos encontraram-se Landeros-Márquez *et al* (2011), Pizarro *et al* (2015) e Valencia *et al* (2017).

Tabela 5 - número de títulos/ano/palavra-chave – SciELO - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década			
fitoextração	3	4	0	0	1	0	1	1	1	2	0	13		13		
fitofiltração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
fitoestabilização	2	5	1	2	2	1	1	4	2	0	0	20		20		
fitovolatilização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
fitodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
fitodesalinização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
fitorremediação	11	18	7	7	5	7	7	8	11	7	3	91		91		
superacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
total	16	27	8	9	8	8	9	13	14	9	3					

Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - número de títulos/ano/palavra-chave – SciELO - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década			
phytoextraction	5	7	2	1	3	0	4	7	3	3	2	37		37		
phytofiltration	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
phytostabilization	3	6	2	3	3	1	5	6	3	1	2	35		35		
phytovolatilization	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
phytodegradation	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3		3		
rhizodegradation	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2		2		
phytodesalination	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1		1		
phytoremediation	20	26	14	13	20	15	24	23	27	21	19	222		222		
superaccumulators	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		
hyperaccumulators	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3		3		
total	28	40	19	18	26	17	36	37	33	26	23					

Elaborado pelo autor.

Dentre os meios de pesquisa integrada que foi realizada para completude deste trabalho, para palavras-chave ou sentenças há possibilidade de pesquisa livre, por assunto, título ou autor. Dentro da pesquisa avançada pôde-se realizar uma extensa quantidade de especificações para sua pesquisa, sendo os principais a classificação das palavras pesquisadas sendo texto completo, por autor, título, termos do assunto, fonte/título da revista científica, resumo, ISSN (*International Standard Serial Number*) ou ISBN (*International Standard Book Number*). Além de tais ferramentas, pôde-se também limitar a pesquisa de acordo com a data de publicação, disponibilidade na coleção da biblioteca, somente catálogo, texto completo podendo estar disponível em PDF ou não. Além de oferecer mais opções a respeito do tipo de documento, assunto, idioma, geografia, coleção e base de dados.

A pesquisa realizada foi feita em todos os títulos disponíveis, todas as bases de dados acessáveis e considerando todos os provedores da plataforma. Notou-se variação entre os resultados totais obtidos quando realizada pesquisa dos anos estudados individualmente e somados e da pesquisa da década como um todo, assim como exibido nas Tabelas 7 e 8, acredita-se que houve repetição de títulos ao longo das pesquisas, porém não sendo suficiente para alterar as conclusões deste estudo.

Tabela 7 - número de títulos/ano/palavra-chave – Biblioteca Central da Universidade de Brasília - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da decada
fitoextração	15	14	10	9	11	13	6	4	11	10	8	111	164
fitofiltração	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
fitoestabilização	8	18	3	9	12	8	8	12	13	1	3	95	148
fitovolatilização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fitodegradação	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	3	3
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fitodesalinização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fitorremediação	75	110	74	99	52	85	83	91	67	72	46	854	854
superacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	98	142	87	119	77	106	97	107	91	83	57		

Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - número de títulos/ano/palavra-chave – Biblioteca Central da Universidade de Brasília - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da decada
phytoextraction	1573	1916	2025	2209	2572	2801	2526	2863	3084	3398	3397	28364	28364
phytofiltration	192	291	255	289	347	335	363	415	414	344	280	3525	3525
phytostabilization	619	988	1044	1100	1471	1407	1401	1718	1750	1727	1804	15029	15029
phytovolatilization	20	74	57	95	57	104	110	102	126	122	160	1027	1047
phytodegradation	210	317	251	352	371	410	401	474	429	405	341	3961	3961
rhizodegradation	20	83	63	85	126	56	131	146	136	145	205	1196	1233
phytodesalination	4	1	3	3	6	11	15	6	15	63	44	171	259
phytoremediation	4248	5330	5760	6463	7444	8694	8742	9299	10746	12833	13078	92637	92637
superaccumulators	1	0	0	0	9	10	0	2	2	2	2	28	20
hyperaccumulators	1575	1902	1862	2394	2395	2669	2458	2437	3062	3168	3066	26988	26988
total	8462	10902	11320	12990	14798	16497	16147	17462	19764	22207	22377		

Elaborado pelo autor.

Dentre os principais títulos encontrados a plataforma apresentou como mais relevantes foram: *Phytoremediation* (Ann Cuypers, San Diego: Elsevier *Science & Technology*, 2017, não foi encontrado para leitura), o livro *Phytoremediation and Stress: Evaluation of Heavy Metal-*

*Induced Stress in Plants* (KADUKOVA & KAVULICOVA, 2010), e as publicações de Zand *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2020). Foram analisados os 3 títulos encontrados mais relevantes e a plataforma não disponibilizou a quantidade de citações de cada título.

O site da NCBI possibilitou pesquisas em 35 bases de dados, fazendo distinção de suas áreas pelos títulos *Literature* (as bases sendo: *Bookshelf, MeSH, NLM Catalog, PubMed, PubMed Central*), *Genes* (as bases sendo: *Gene, GEO DataSets, GEO, Profiles, HomoloGene, PopSet*), *Proteins* (as bases sendo: *Conserved Domains, Identical Protein Groups, Protein, Protein Family Models, Structure*), *Genomes* (as bases sendo: *Assembly, BioCollections, BioProject, BioSample, Genome, Nucleotide, SRA, Taxonomy*), *Clinical* (as bases sendo: *ClinicalTrials.gov, ClinVar, dbGaP, db SNP, dbVar, GTR, MedGen, OMIM*) e *PubChem* (as bases sendo: *BioAssays, Compounds, Pathways, Substances*).

A natureza quantitativa dessa plataforma levou a pesquisa na *National Library of Medicine*, que será tratada a seguir. Os dados coletados na NCBI não apresentaram possibilidade de distinção de ano dentro da plataforma, assim sendo, apenas o número total de títulos por base de dados foi contabilizado (Tabelas 9, Quadro 2 e Gráfico 3), o que resultou nos dados apresentados.

Os dados coletados na NCBI não foram contabilizados por ano o que resultou em sua não utilização nos Gráficos 1 e 2 e as palavras-chave em português retornaram apenas 4 resultados para fitorremediação, sendo 1 para o ano de 2015, 1 para 2016 e 2 em 2020, todos apresentados na classe *Literature* no PubMed Central.

Tabela 9 - número de títulos/palavra-chave com quantidades de títulos/base de dados – *National Center for Biotechnology Information* - 1

mostrado na pesquisa da decada	
phytoextraction	3579
phytofiltration	91
phytostabilization	5407
phytovolatilization	145
phytodegradation	168
rhizodegradation	198
phytodesalination	24
phytoremediation	94629
superaccumulators	1200
hyperaccumulators	3863
total	109304

Elaborado pelo autor.

Quadro 2 – Categorização da quantidade de títulos/palavra-chave/fonte - NCBI

Palavra-Chave	Fontes Dos Títulos
---------------	--------------------

Phytoextraction	Literature (Bookshelf - 6, Pubmed - 1554, Pubmed Central - 1395), Genes (Popset - 10), Proteins (Protein - 25), Genomes (Bioproject - 4, Nucleotide - 164, Sra - 1)
Phytofiltration	Literature (Pubmed - 46, Pubmed Central - 45)
Phytostabilization	Literature (Pubmed - 629, Pubmed Central - 494), Genes (Geo Datasets - 1, Popset - 4), Proteins (Protein - 34), Genomes (Bioproject - 10, Biosample - 33, Nucleotide - 509, Sra - 114)
Phytovolatilization	Literature (Pubmed - 37, Pubmed Central - 108)
Phytodegradation	Literature (Pubmed - 46, Pubmed Central - 122)
Rhizodegradation	Literature (Bookshelf - 1, Pubmed - 65, Pubmed Central - 87), Genomes (Bioproject - 2, Nucleotide - 43)
Phytodesalination	Literature (Pubmed - 11, Pubmed Central - 13)
Phytoremediation	Literature (Bookshelf - 395, Mesh - 1, Nlm Catalog - 150, Pubmed - 50566, Pubmed Central - 25533), Genes (Gene - 1, Geo Datasets - 12, Popset - 29), Proteins (Protein - 13628), Genomes (Bioproject - 92, Biosample - 24, Nucleotide - 2824, Sra - 1369), Pubchem (Bioassays - 4)
Superaccumulators	Literature (Pubmed - 1074, Pubmed Central - 126)
Hyperaccumulators	Literature (Bookshelf - 1, Pubmed - 2584, Pubmed Central - 830), Genes (Geo Datasets - 2, Popset - 1), Proteins (Protein - 37), Genomes (Bioproject - 12, Nucleotide - 390, Sra - 6)

Elaborado pelo autor.

A pesquisa realizada na plataforma PubMed permitiu buscar por palavra-chave, contando com uma caixa de consulta, onde pode-se digitar um texto que refina a pesquisa. Após a pesquisa, o PubMed retornou um gráfico com a quantidade de resultados encontrados por ano, o número total de resultados e os títulos encontrados.

O meio de apresentação dos resultados possibilitou verificação de trechos dos trabalhos ou não e oferece a opção de demonstrar o sumário ou o resumo. A ordenação pôde ser pela melhor correspondência, trabalho mais recente, data de publicação, primeiro autor ou por revista.

Além do já descrito, também foi possível delimitar os anos dos títulos que aparecem nos resultados utilizando o gráfico de publicações/ano que é disponibilizado, apresentando também possibilidade de filtrar os resultados por disponibilidade do texto, tipo de artigo, data de publicação (1, 5, 10 anos ou intervalo personalizado), espécie que se referênciam no trabalho, linguagem, sexo estudado, sujeito do estudo e idade dos sujeitos (criança, adolescente, adulto, entre outros).

A pesquisa realizada buscou em todos os títulos disponíveis entre os anos de 2010 e 2020 e, fez-se também a busca individualmente em cada ano, verificando disparidades entre as quantidades de títulos encontrados, como descrito na Tabela 10. As palavras-chave em português não retornaram nenhum resultado, assim sendo não houve dados para análise.

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da decada	
phytoextraction	75	90	77	90	104	134	129	138	156	187	237	1417		1207
phytofiltration	1	2	4	4	3	3	5	3	7	4	4	40		32
phytostabilization	15	31	37	45	59	54	54	69	70	92	112	638		532
phytovolatilization	1	4	4	4	0	1	2	0	2	1	4	23		20
phytodegradation	0	3	0	3	3	4	2	7	6	3	4	35		31
rhizodegradation	2	4	3	4	4	0	6	6	5	9	15	58		53
phytodesalination	1	0	0	1	0	1	1	1	2	3	3	13		11
phytoremediation	2477	2588	2643	2745	2717	2830	3045	2891	3052	3439	3582	32009		26705
superaccumulators	28	22	43	52	67	64	82	93	102	121	127	801		724
hyperaccumulators	131	120	131	164	156	186	172	164	219	225	302	1970		1696
total	2731	2864	2942	3112	3113	3277	3498	3372	3621	4084	4390			

Elaborado pelo autor.

Dentre os resultados apresentados, por melhor correspondência ao tema, foram encontrados os trabalhos de Praveen & Pandey (2019), Liu *et al* (2020), Wei *et al* (2020) e o trabalho de Wang & Chao de 2020, *Phytoremediation of heavy metal contamination and related molecular mechanisms in plants*, contudo este último título somente foi encontrado em mandarim o que impossibilitou sua leitura e sua tradução via ferramentas disponíveis na internet se mostrou falha.

A plataforma Scopus dividiu a pesquisa em seus dados entre autores, documentos e afiliações. Para esta pesquisa foi realizado busca em todos os títulos no período de 2010 a 2020 em todos os campos disponíveis. Foram oferecidas as opções de refino de pesquisa sendo nome dos autores, instituições e diversos operadores para delimitação da busca as ferramentas disponíveis. Foi necessário vínculo com instituição de ensino superior para ser possível utilizar a plataforma de busca da Scopus.

Dentre os resultados encontrados os estudos com mais citações foram de Compant *et al* (2010), Bulgarelli *et al* (2012), Lundberg *et al* (2012) e Ali *et al* (2013), apresentando 1067, 1070, 1253 e 1671 citações, respectivamente. Como o texto de Ali *et al* (2013) já foi tratado anteriormente, será desconsiderado neste próximo momento. A seguir se apresentam os dados quantitativos obtidos na Scopus (Tabelas 11 e 12):

Tabela 11 - número de títulos/ano/palavra-chave – Scopus - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da decada	
fitoextração	1	2	1	1	1	2	1	0	0	0	1	10		10
fitofiltração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
fitoestabilização	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4		4
fitovolatilização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
fitodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
fitodesalinização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
fitorremediação	4	2	1	3	3	0	2	1	2	5	5	28		28
superacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
total	5	6	2	4	4	2	3	3	2	5	6			

Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - número de títulos/ano/palavra-chave – Scopus - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década
phytoextraction	153	177	195	169	202	245	200	244	248	264	312	2409	2409
phytofiltration	6	5	5	4	6	6	7	7	11	7	10	74	74
phytostabilization	35	74	85	71	103	99	97	141	128	123	165	1121	1121
phytovolatilization	5	5	5	6	4	14	7	14	11	7	14	92	92
phytodegradation	2	7	5	8	7	15	8	14	16	12	12	106	106
rhizodegradation	3	6	6	8	10	6	13	10	14	12	18	106	106
phytodesalination	2	0	0	3	2	1	6	1	2	6	4	27	27
phytoremediation	596	764	763	822	920	1039	1082	1216	1239	1416	1621	11478	11478
superaccumulators	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
hyperaccumulators	148	166	155	198	169	211	178	205	239	228	260	2157	2157
total	950	1204	1219	1289	1423	1637	1598	1852	1908	2075	2416		

Elaborado pelo autor.

A pesquisa realizada na plataforma *Springer* apresentou possibilidade de refino por tipo de conteúdo (livros, jornais, séries, entre outros), tópico, data de lançamento (a ser lançado, lançado no último mês, últimos 3 meses, últimos 6 meses ou mais antigos) e linguagem. Grande parte dos títulos encontrados foi de livros, alguns resultados para revistas e 1 série com seus valores descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - número de títulos totais/palavra-chave demonstrando as últimas publicações do último semestre, trimestre e mês – Springer - 1

palavra-chave	mostrado na pesquisa da década	últimos 6 meses	últimos 3 meses	último mês
phytoextraction	23	3	0	0
phytofiltration	2	1	1	0
phytostabilization	8	0	0	0
phytovolatilization	1	0	0	0
phytodegradation	2	1	0	0
rhizodegradation	2	1	1	0
phytodesalination	0	0	0	0
phytoremediation	290	32	22	10
superaccumulators	0	0	0	0
hyperaccumulators/hyperaccumulator	10	1	1	0
total	338	39	25	10

Elaborado pelo autor.

A pesquisa na plataforma não apresentou nenhum título disponível gratuitamente por meios próprios, assim sendo, só se foi possível acessar uma prévia grátis e um breve resumo dos livros encontrados o que não oferece informação suficiente para nenhuma apresentação melhor dos estudos apresentados, assim sendo, se optou pela leitura de 10% dos resumos dos títulos encontrados e sua classificação entre as categorias definidas anteriormente, elas serão verificadas na ordem encontrada.

Tendo sido encontrados 338 títulos, se fará menção a 34 dos resumos disponibilizados pela ordem encontrada na plataforma. Devido a grande maioria (290) dos títulos se demonstrar a partir da palavra chave “*phytoremediation*”, foram coletados os dados a partir de tal pesquisa. Após análise se optou pela apresentação de títulos verificando a menção aos assuntos: técnicas

de fitorremediação, manipulação de poluentes, remediação do solo, remediação da água, remediação do ar, hiper/superacumuladores e associações entre organismos.

Os resultados e títulos encontrados foram apresentados no Quadro 3, foram coletados 35 títulos pois um apresentou erro quando se buscava sua página. Resumidamente, para os assuntos de técnicas de fitorremediação, a respeito de manipulação de poluentes ou contaminantes, da remediação do solo ou ambiente, remediação da água, do ar, a respeito de hiper/superacumuladores ou associações entre organismos foram citados nos resumos dos títulos agregados 23, 20, 25, 15, 1, 3 e 15 vezes, respectivamente, demonstrando como os livros fazem foco principalmente aos primeiros três assuntos, com pouco foco a respeito do remediação do ar e hiper/superacumuladores.

Quadro 3 - Títulos Springer por menção de assuntos

Quadro títulos Springer por menção de assuntos

título, editor e ano/menção a	técnicas de fitorremediação	manipulação de poluentes/contaminantes	remediação do solo/ambiente	remediação da água	remediação do ar	hyper/superacumuladores	associações entre organismos
Advanced Science and Technology for Biological Decontamination of Sites Affected by Chemical and Radiological Nuclear Agents, Marmiroli, Samotokin, Marmiroli, 2007		x	x				
Applied Bioremediation and Phytoremediation, Singh, Ward, 2004	x			x			
Beneficial Plant-Bacterial Interactions, Glick, 2015			A Springer retornou erro entrando na página do título.				
Bioremediation of Soils Contaminated with Aromatic Compounds, Heipieper, 2007	x	x	x	x	x		x
Detoxification of Heavy Metals, Sherameti, Varma, 2011		x	x	x			
Extraction of Metals from Soils and Waters, Roundhill, 2001	x	x					
Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants, Lichtfouse, Schwarzbauer, Robert, 2015			x	x			
Innovative Approaches to the On-site Assessment and Remediation of Contaminated Sites, Reible, Demnerova, 2002			Sem resumo disponível				
Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater, Landmeyer, 2012	x		x	x			
Phyto and Rhizo Remediation, Aora, Kumar, 2019	x	x	x				
Phyobiome and Ecosystem Restitution, Kumar, Prasad, 2018		x	x				x
Phytoremediation and Biofortification, Two Sides of One Coin, Yin & Yuan, 2012	x		x				x
Phytoremediation for Environmental Sustainability, Prasad, 2022	x	x	x	x			x
Phytoremediation for Green Energy, Öztürk, Ashraf, Aksoy, Ahmad, 2015	x	x	x	x			x
Phytoremediation In-situ Applications, Shmaefsky, 2020	x		x	x			x
Phytoremediation Methods and Reviews, Vol.23, Willey, 2007	x	x					x
Phytoremediation of Arsenic Contaminated Sites in China, Chen, Lei, Wan, Zhou, Yang, 2020	x		x			x	
Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils, Morel, Echevarria, Goncharova, 2006	x		x			x	
Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants, Baudhh, Singh, Korstad, 2017							
Phytoremediation Rhizoremediation, Mackova, Dowling, Macek, 2006	x	x	x				
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.1, Ansari et al., 2015	x	x	x	x			x
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.2, Ansari et al., 2015	x	x	x	x			x
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.3, Ansari et al., 2016	x	x	x	x			x
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.4, Ansari et al., 2016	x	x	x				x
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.5, Ansari et al., 2017	x	x	x				x
Phytoremediation, Management of Environmental Contaminants, Vol.6, Ansari et al., 2018	x	x	x	x			x
Phytoremediation, Tsao, 2003	x		x	x			x
Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-up, Dhir, 2013	x	x	x	x			
Plant Adaptation and Phytoremediation, Ashraf, Öztürk, Ahmad, 2010		x	x				x
Plant-Based Remediation Processes, Gupta, 2013	x	x	x				
Plants and Heavy Metals, Furini, 2012	x					x	
Sustainable Agriculture Reviews, Vol.13, Lichtfouse, 2014							
The Plant Family Brassicaceae, Anjum, Ahmad, Pereira, Duarte, Umar, Khan, 2012	x	x	x				
Total	23	20	25	15	1	3	15

Elaborado pelo autor.

Dentro da plataforma *Publons* ressaltou-se a possibilidade de busca por pesquisadores, publicações, periódicos, instituições, país/região e um índice do COVID-19. A pesquisa realizada foi nas publicações disponíveis na plataforma, que limita os resultados em até 1500, sendo possível pesquisa por título, campo de pesquisa, periódico e DOI (*Digital Object Identifier System*). Os títulos encontrados possuem possibilidade de ordenação por data, título ou pontuação atribuída pela plataforma, a utilizada nas pesquisas foi por data para possibilidade de contabilização e classificação das publicações por ano.

Para as pesquisas que foram encontrados menos de 1500 títulos foi possível contabilizá-las por ano, porém, no caso da busca da palavra-chave “*phytoremediation*” que apresentou 3847 resultados, não foi possível a contabilização pela limitação da plataforma, assim sendo, os resultados foram expostos nas Tabelas 14 e 15 e a contabilização demonstrada nas Tabelas 16 e 17, disponíveis nos anexos. Foram possíveis de classificar 1219 dos títulos encontrados para “*phytoremediation*”, os outros 281 títulos foram do ano de 2021.

Tabela 14 - número de títulos/ano/palavra-chave – *Publons* - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década		mostrado na pesquisa geral	
fitoextração	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3		3		4
fitofiltração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
fitoestabilização	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		2		2
fitovolatilização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
fitodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
fitodesalinização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
fitorremediação	3	0	1	2	0	0	4	1	2	0	0	13		13		24
superacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
total	3	4	1	2	0	0	4	1	3	0	0	0		18		30

Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - número de títulos/ano/palavra-chave – *Publons* - 2

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década		mostrado na pesquisa geral	
phytoextraction	45	43	47	59	52	64	52	76	66	85	85	674		674		987
phytofiltration	1	3	1	1	2	2	4	2	5	2	2	25		25		36
phytostabilization	4	12	11	13	19	14	18	28	24	29	34	206		206		255
phytovolatilization	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	4		4		6
phytodegradation	0	2	0	0	2	2	0	1	0	2	1	10		10		18
rhizodegradation	0	1	1	0	3	0	2	2	1	0	4	14		14		20
phytodesalination	2	0	1	1	0	1	2	1	1	4	1	14		14		15
phytoremediation									312	420	459	1191				3843
superaccumulators	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0		0
hyperaccumulators	4	5	8	12	8	6	2	3	6	9	9	72		72		109
total	56	67	69	86	86	89	81	113	415	551	597			1019		5289

Elaborado pelo autor.

Em branco - não foi possível contabilizar o número de publicações devido a limitação da plataforma utilizada.

Para os principais títulos que foram revistos, fez-se busca pelos títulos com maior pontuação fornecida pela plataforma, assim como maiores quantidades de citações. Entre os principais resultados ressaltaram-se os títulos de Coninx *et al* (2017), Gomez (2018) e Milčić (2019). A plataforma apresentou livros presentes na *Springer* como resultados mais relevantes e um artigo aos quais não foram conseguidos acesso, foram eles: *Phytoremediation* editado por Ansari, Gill, Gill, Lanza e Newman de 2015, volumes 1 e 2; o capítulo *Phytoremediation of Explosives*, produzido por Stephen M. Via, páginas 261-284 do livro *Phytoremediation*,

editado por Brian R. Shmeafsky, publicado em 2020; o livro *Microbe-Assisted Phytoremediation on Environmental Pollutants*, por Vineet Kumar e Gaurav Saxena publicado em 2020; e o artigo de Yadav, Batra e Sharma, *Phytoremediation and Phytotechnologies* publicado em 2016.

Dentre as publicações acessadas, o artigo *Pteridophytes in phytoremediation* (PRAVEEN & PADNEY, 2019) apareceu novamente. Além de tal título, os trabalhos encontrados de Coninx *et al* (2017), Gomez (2018) e Milčić *et al.* (2019) apresentaram 4, 0 e 29 citações na plataforma. O trabalho de Gomez (2018) não apresentou citações na plataforma, todavia não significa que não foi citado em outras plataformas ou meios não eletrônicos.

O acesso ao *Web of Science* foi adquirido via acesso CAFE disponível a partir do acesso institucional da CAPES via UnB. A plataforma ofereceu 25 campos diferentes para pesquisa, contando com delimitação temporal, escolha de índice, coleção ou base de dados, edição, opções de texto e consulta pré-visualizada. Após resultado verificou-se a existência de filtros contando com a divisão por ano, o tipo de documento, categoria do *WoS*, autores, afiliações, títulos de publicação, editora, agência fundadora, grupos de autores, área de pesquisa, linguagem, países e regiões, entre outros.

Os títulos encontrados apresentaram o número de citações e referências, além de um resumo do conteúdo, autores, ano de publicação, um link para a verificação do impacto do título, dentre outras informações e podem ser ordenados de 14 maneiras diferentes. Um diferencial da plataforma é a opção da análise dos resultados, que oferece dados quantitativos a respeito de todos os títulos encontrados na pesquisa os dividindo por campo e demonstrando e comparando a contagem de registros e a porcentagem do total de títulos. Ressalta-se como esta plataforma foi a melhor equipada para pesquisa e coleta de dados devido às ferramentas disponibilizadas e a facilidade de uso.

A pesquisa foi realizada em todos os campos, dentro da *Web of Science Core Collection*, dentro da década alvo, os resultados para as palavra-chave em português não foram satisfatórios então se optou pela apresentação apenas dos dados quantitativos obtidos pesquisados em inglês (Tabela 18). Na década de 2010-2020 foram encontrados 3 títulos que apresentam mais de 1.000 citações, sendo a mais citada referência principal para construção deste trabalho, contando no dia 30/07/2021 com 1497 citações, o trabalho de Ali, H.; Khan, E. e Sajad, M.A., *Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications*, de 2013.

Tabela 18 - número de títulos/ano/palavra-chave – *Web of Science* - 1

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da decada
phytoextraction	210	234	278	248	273	320	288	314	341	401	423	3330	3330
phytofiltration	7	6	7	4	6	3	6	6	8	9	8	70	70
phytostabilization	32	64	84	76	98	82	96	135	115	131	164	1077	1077
phytovolatilization	2	3	2	4	0	3	2	2	3	4	5	30	30
phytodegradation	2	6	4	8	5	6	4	6	8	9	8	66	66
rhizodegradation	3	5	6	7	9	2	7	8	8	13	15	83	83
phytodesalination	2	0	0	2	3	1	7	1	2	6	3	27	27
phytoremediation	593	654	726	767	809	1008	1034	1120	1256	1536	1540	11043	11043
superaccumulators	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
hyperaccumulators	33	40	43	47	43	75	57	40	73	81	78	610	610
total	884	1012	1150	1163	1246	1501	1501	1632	1814	2190	2244		16337

Elaborado pelo autor.

Para a data 02/08/2021, os primeiros sete títulos no *WoS* a respeito de fitorremediação apresentavam 887, 730, 841, 1031, 1206, 1499 e 883 e citações, dos trabalhos de Compant *et al.* (2010), Hayat *et al.* (2010), Rascio & Navari-Izzo (2011), Bulgarelli *et al.* (2012), Lundberg *et al.* (2012), Ali *et al.* (2013) e Bolan *et al.* (2014), respectivamente. Os primeiros quatro títulos encontrados foram citados anteriormente quando tratados a respeito do Google Acadêmico e da Scopus.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Poluição e contaminação do solo e seus efeitos adversos

A poluição do solo se refere a presença de substâncias não comuns em determinado local ou em sua concentração maior que a normal, causando efeitos adversos em qualquer organismo, que normalmente não seria envolvido com tal substância. Tal poluição pode gerar a contaminação e/ou a degradação de solos por diversas maneiras (FAO, 2018b).

A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2018b) classificou os principais poluentes do solo entre orgânicos e inorgânicos, dentre os inorgânicos existem metais/metaloídes (Ex.: Cd, Pb, Cu, Zn, Ar) e não-metais (Ex.: cianetos, amônia, enxofre). Dentre os inorgânicos, dividiu-se entre clorados e não clorados e ambas as classes são divididas entre alcenos e alifáticos. Dentre as possíveis fontes de poluentes do solo, a classificação existente era entre fontes geogênicas (ou naturais) e antropogênicas. Fontes naturais de poluição do solo incluem diversos elementos produzidos ou liberados por atividades naturais (Ex.: erupções vulcânicas, queimadas florestais, amiantos de ocorrência natural). As fontes antropogênicas se dividem entre atividades industriais, mineração, infraestruturas urbanas e de transporte, geração de lixo e esgoto e sua disposição, atividades militares e guerras e atividades de agricultura e pecuária.

Os principais poluentes do solo foram divididos pela FAO (2018b) entre metais pesados e metaloides, nitrogênio e fósforo (principalmente pelo uso de fertilizantes sintéticos), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (poluentes orgânicos persistentes e semivoláteis. Ex.: combustão de combustível fóssil), poluentes orgânicos persistentes, radionuclídeos, poluentes emergentes (químicas sintéticas ou naturais que apareceram recentemente e não são comumente monitoradas), microrganismos patogênicos e bactérias e genes resistentes a antimicrobianos.

Metais pesados, segundo Kemp (1998), são aqueles que apresentam um peso atômico relativamente alto, como exemplo são citados mercúrio (Hg), chumbo (Pb), estanho (Sn) e cádmio (Cd). Metais pesados podem ser encontrados naturalmente no meio ambiente, porém, grandes problemas de poluição ocorrem quando eles são liberados via processamento de minerais e metais ou por atividades industriais.

Segundo documento disponível pela FAO & ITPS (2015) a poluição do solo vem se apresentado como questão alarmante, foi identificada como a terceira maior ameaça às funções do solo na Europa, quarta maior ameaça no Norte da África, quinta na Ásia, sétima no Noroeste Pacífico, oitava na América do Norte e nona na América Latina e África Subsaariana.

A poluição do solo ocorre devido a atividades que incluem o depósito direto de contaminantes no solo ou processos ambientais que causam contaminação do solo de maneira indireta via água ou deposição atmosférica (TARAZONA, 2014). Ressalta-se como as principais fontes de poluição do solo que podem ser agrupadas em quatro atividades principais: (1) Poluição industrial *in-situ* e gestão de resíduos inadequada, (2) atividades mineradoras, (3) aplicação intencional direta de materiais ao solo e (4) deposição atmosférica.

Tratando sobre atividades mineradoras, Tarazona (2014) traz que a contaminação do solo pode ocorrer por atividades operacionais padrão, caso não sejam implementadas medidas de gerenciamento de riscos adequadas, e após o fim das atividades mineradoras, caso não sejam tomadas medidas de reparação adequadas. A principal preocupação durante as operações de mineração são os resíduos gerados, os materiais acumulados após a separação da parte valiosa do resto. Tais resíduos podem ainda conter metais, não sendo suficientes para justificar sua explorabilidade econômica, mas ainda sendo suficiente para causar impactos ambientais preocupantes.

As atividades mineradoras de superfície geram impactos no terreno da atividade, removendo vegetação, alterando relevo e solo e perturbando processos hidrológicos. Impactos majoritários ocorrem no solo, água e biota desde tempos antigos devido a tais atividades (FAO & ITPS, 2015; KUMAR et al., 2015b; AHIRWAL & MAITI, 2016).

Segundo a FAO (2018a) a degradação do solo é definida como a mudança no estado de saúde do solo resultando em uma capacidade diminuída do ecossistema de prover bens e serviços a seus beneficiários. Já a contaminação do solo ocorre quando há “presença de produto(s) químico(s) ou substâncias fora de lugar e/ou em maior concentração que a ocorrida naturalmente, mas não sendo necessariamente prejudicial” (FAO, 2018b).

A contaminação do solo por metais pesados se refere ao acúmulo excessivo de metais pesados tóxicos causados por atividade humana que incluem exemplos de toxicidade biológica significativa ou apenas alguma toxicidade. Os elementos que se encaixam em tal descrição são: mercúrio (Hg), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), arsênio (As), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), estanho (Sn), vanádio (V), entre outros. (SU *et al.*, 2014)

Wani *et al.* (2018) descreveu de maneira didática os impactos diferentes da existência de metais pesados no ciclo de vida de plantas e as dividiu entre mudanças celulares e fisiológicas. As mudanças celulares citadas são impactos no ciclo e no expoente de divisão celular e mudanças na formação de cromossomos. Os impactos fisiológicos são efeitos adversos no crescimento da planta, efeitos inibidores na fotossíntese, na absorção de clorofila, redução de absorção de nutrientes e atividade enzimática, além de possibilidade de desidratação.

Tendo em vista a necessidade da reparação ambiental de locais contaminados, países em todo planeta vem desenvolvendo e implementando meios de investigação, mitigação e remediação de áreas com solo contaminado nas últimas décadas. No Brasil, em 28 de dezembro de 2009, foi editada a Resolução CONAMA nº420 que dispõe sobre “critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas”.

Solos contaminados apresentam potenciais riscos para a saúde humana tendo em vista que há possibilidade de contato com metais pesados em tais sítios. Os principais meios de contaminação pelo solo são, segundo a ATSDR (2005), ingestão direta, contato e reação dérmicos, contato e reação oculares, inalação de compostos químicos voláteis presentes no solo e inalação de pó. A Quadro 4 reafirma alguns dos riscos de ingestão de determinados metais pesados por seres humanos.

**Quadro 4.** Impacto de ingestão de elementos poluentes na saúde humana

<b>Elemento</b>	<b>Impacto na saúde humana devido a toxicidade</b>
Arsênico	Câncer de pele, hiperqueratose, hiperpigmentação, pé preto, erupções cutâneas, câncer interno órgãos
Cádmio	Disfunção tubular renal, proteinúria, glicosúria, aminoacidúria, doença <i>itai-itai</i>
Cromo	Disfunção renal, câncer de pulmão

Flúor	Calcificação dos ligamentos, osteosclerose, ossificação endocondral, espessamento de ossos chatos, osteomalácia e osteoporose
Chumbo	Encefalopatia (dano ao cérebro), falha na reprodução, distúrbio metabólico, déficit neurofísico em crianças, afeta o sistema hematológico e renal, anemia, hipertensão
Mercúrio	Danos ao sistema nervoso central, retardo mental e déficits neuromusculares em feto, gastroenterite grave, dor em queimação na boca, salivação, dor abdominal, vômito, colite, gengivite crônica e distúrbios mentais
Selênio	Sinais clínicos adversos persistentes desenvolvidos com morbidade de até 50%; perda de cabelo, deformidades nas unhas, selenose
Zinco	Interfere na reprodução, prejudica o crescimento do embrião

Retirado e traduzido de: Datta (2017). Com dados de: Oliver (1997); Gupta e Gupta (1998); Deckers e Steinnes (2004).

Além dos possíveis impactos na saúde humana, a contaminação por metais pesados afeta o meio ambiente e seus organismos, tendo a situação de microrganismos em relação a contaminação estabelecida por Fliebbach *et al.* (1994) demonstrando uma redução de atividade microbiana em altas concentrações de metais pesados e uma estimulação de seu crescimento quando em baixa concentração no solo.

### 3.2 Fitorremediação, um meio de descontaminação do solo

Em plantas, já foi observado em diversos estudos, que em baixa concentração no solo, metais pesados não afetam seu crescimento, todavia quando há maiores concentrações dos metais há maiores influências em seu crescimento, podendo haver até inibição do crescimento da planta ou sua morte (LEPP, 1981; SHAW, 1989; DALCORSO, 2012).

Dentre as maneiras de realização da remediação de solos contaminados com metal pesado a fitorremediação vem se mostrando como técnica promissora (TAVARES *et al.*, 2013; BANERJEE *et al.*, 2014; WEI *et al.*, 2020). Os estudos a respeito da fitorremediação como método de remediação de locais contaminados vem sendo cada vez mais explorados nos últimos anos (WEI *et al.*, 2020) analisando situações no solo, na água e no ar, entretanto, mais estudos são necessários para prover uma metodologia de remediação ideal com impacto ambiental mínimo.

Primeiramente, sugerido por Chaney (1983), a fitorremediação vem como uma proposta economicamente viável, visualmente agradável e ambientalmente amigável para solução de determinados problemas de poluição, contaminação ou intoxicação do solo, ar ou água (CHANEY *et al.* 1997).

A fitorremediação é definida por Salt (1995) como o uso de plantas acumuladoras de metais que foram especialmente selecionadas e projetadas para limpar o ambiente. A fitorremediação engloba a Fitoextração - o uso de plantas acumuladoras de metais para extração de metais pesados do solo; a Rhizofiltração - o uso de raízes das plantas para remoção de metais pesados da água; e a Fitoestabilização - o uso de plantas para eliminar a biodisponibilidade de metais tóxicos no solo (CUNNINGHAM *et al.*, 1995).

A palavra fitorremediação vem do grego *phyto* - planta – e Latim *remedium* – correção ou remoção do mal (ALI *et al.* 2013). Plantas possuem uma grande capacidade de captar poluentes do meio ambiente assim concluindo sua desintoxicação via vários mecanismos.

Em uma compilação realizada por Alkorta *et al.* (2013), as técnicas e estratégias da fitorremediação se dividem entre fitoextração, fitofiltração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, rhizodegradação e fitodesalinização. A realização de atividade fitorremediativa utiliza de diversas técnicas para realização hábil do processo de remediação. O Quadro 5 a seguir traz um resumo das descrições das diferentes técnicas de fitorremediação:

**Quadro 5.** Resumo das diferentes técnicas de fitorremediação.

Técnica	Descrição
Fitoextração	Acumulação de poluentes em biomassa colhível (brotos).
Fitofiltração	Sequestro de poluentes em águas contaminadas realizados por plantas.
Fitoestabilização	Limitação de mobilidade e biodisponibilidade de poluentes por raízes de plantas.
Fitovolatilização	Conversão de poluentes para forma volátil e sua subsequente liberação na atmosfera.
Fitodegradação	Degradação orgânica xenobiótica por enzimas de plantas dentro dos tecidos da planta.
Rhizodegradação	Degradação de xenobióticos orgânicos na rizosfera por microrganismos rizosféricos.
Fitodesalinização	Remoção de excessos de sais de solos salinos por halófitas.

Retirado e traduzido de: Ali *et al.* (2013).

Fitoextração é a técnica mais recomendada para a remoção de metais pesados e metaloides do solo (CLUIS, 2004), entretanto sua eficiência depende de diversos fatores. Chaney *et al.* (1997) trazem como os dois fatores essenciais para o potencial fitorremediativo de uma planta seus níveis de hiperacumulação e hipertolerância. Ressalta-se aqui como a divisão das técnicas de fitorremediação são necessárias para entendimento do processo fitorremediativo, porem são intrínsecas no momento de realização de remediação de

determinado local ou ambiente, não sendo possíveis ou completas sem a utilização de algumas técnicas em conjunto.

No Brasil, o CONAMA estabelece guias para a fitorremediação de áreas contaminadas na Resolução CONAMA No 463, de 29 de julho de 2014, onde se dispõe sobre o controle ambiental de produtos destinados à remediação.

Ali *et al.* (2013) traz como as plantas adequadas para realização da atividade deveriam, idealmente, apresentar (TONG *et al.*, 2004; SHABANI & SAYADI, 2012): (I) alta taxa de crescimento; (II) produção de maior quantidade de biomassa presente acima do solo; (III) sistema de raízes amplamente distribuído e ramificado; (IV) maior acumulação dos metais pesados alvos do solo; (V) translocação dos metais pesados das raízes para os brotos; (VI) tolerância a efeitos tóxicos dos metais pesados alvo; (VII) boa adaptação para se manter no meio ambiente e nas condições climáticas; (VIII) resistência a pestes e agentes patogênicos; (IX) cultivo e colheita fáceis; (X) repulsão dos herbívoros para evitar contaminação da cadeia alimentícia.

A composição química e as propriedades do solo influenciam na mobilidade e biodisponibilidade de metais (KLOS *et al.*, 2012). A biodisponibilidade, é definida como a capacidade de como um conteúdo total ou parcial de uma espécie química integrante de um material geológico que é passível de ser liberada na superfície terrestre por processos físicos, químicos ou biológicos (RODRIGUES *et al.*, 2014). Tal fator é crítico para a eficiência da fitoextração de metais pesados, baixa biodisponibilidade é considerada um fator de extrema limitação para a possibilidade de fitoextração de, por exemplo, chumbo (ALI *et al.*, 2013).

Existem plantas com capacidades superiores de absorção e armazenamento de determinados elementos, assim sendo, há também a engenharia genética de tais organismos para a possível sobrevivência de seus sucessores em ambientes mais contaminados por metais pesados, visando assim sua utilização em atividades humanas (WANI *et al.*, 2018). Plantas transgênicas já foram desenvolvidas com capacidade superior de captação, transporte e acumulação de metais visando, também, a desintoxicação de poluentes orgânicos (CHERIAN, 2005).

Com o desenvolvimento da tecnologia, novos usos da fitorremediação vem sendo descobertos. Dentre eles, ressalta-se a fitorremediação *in situ* de resíduos de mineração (ALBUQUERQUE *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017), de solos contaminados de minas abandonadas (EL RASAFI *et al.*, 2020), de solos tropicais contaminados por chorume (SANTOS *et al.*, 2019), de resíduos industriais (SILVA *et al.*, 2016) e aquíferos contaminados (LUIZ *et al.*, 2016). Um exemplo de fitorremediação realizada em sítio de mineração de minério

de ferro foi descrita por Banerjee *et al.* (2019), onde foi verificada a possibilidade da utilização de *Chrysopogon zizanioides* (L.) como de possível crescimento sobre solo de mina visando a reabilitação do solo tendo em vista sua tolerância de contaminação por metais.

No Brasil, um exemplo de processo fitorremediativo realizado foi trazido por Procópio *et al.* (2009), onde se realizou a utilização de *Panicum maximums* sobre uma cultura de soja contaminada com herbicida picloram, onde foi verificada com sucesso a capacidade de remediação do solo por tal herbicida.

As principais limitações da fitorremediação trazidas por Ali *et al.* (2013) se apresentam entre: o longo tempo para o término do processo, a eficiência de grande maioria de hiperacumuladores de metais é geralmente limitada pela sua baixa taxa de crescimento e biomassa, dificuldades na movimentação e biodisponibilidade limitada de metais no solo, sua aplicação sendo possível apenas em sítios com contaminação por metais pesados leve a moderada e risco da contaminação da cadeia alimentícia em caso de falhas na administração ou falta de cuidado (CLEMENS, 2001; TONG *et al.*, 2004; LEDUC & TERRY, 2005; KARAMI *et al.*, 2010).

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A pesquisa focou nos dados quantitativos fornecidos pelas bases de dados, assim como um aprofundamento qualitativo em cada um dos principais títulos e apresentação de resultados encontrados. A seguir se apresenta a respeito dos trabalhos retornados a partir da pesquisa, divididos entre fitorremediação e suas técnicas, algumas espécies específicas de plantas utilizadas em processo fitorremediativo, PGPR e fitorremediação, alguns elementos que foram fitorremediados com sucesso e outros pontos ressaltados da fitorremediação ao longo da pesquisa, seguido pela apresentação dos principais trabalhos encontrados e ao final, uma análise geral e apresentação dos dados coletados como um todo.

Em casos de aparição de títulos repetentes ou duplicados, se fez menção a eles no momento da metodologia. Após coleta de dados observou-se como a palavra-chave que mais apresentou resultados foi “*phytoremediation*”, assim sendo, foi feita análise dos principais títulos apresentados por pesquisa em tal palavra.

#### 4.1 Fitorremediação e suas técnicas

As publicações retornadas pelas pesquisas para fitorremediação e descrições de suas técnicas, incluindo revisões metodológicas e bibliográficas foram de Saier Jr. & Trevors (2010), Rascio & Navari-Izzo (2011), Ali *et al.* (2013), Bolan *et al.* (2014), Milčić *et al.* (2019) e Wei *et al.* (2020).

A publicação de Saier Jr. & Trevors (2010) se iniciou com uma exemplificação do mal que metais pesados podem causar nos seres humanos e como cerca de 20% da área superficial da Europa sofre algum tipo de contaminação ou degradação no solo, seguido por comentários a respeito da dificuldade da descontaminação de tais solos. A seguir os autores trataram das estratégias de uso de plantas e micróbios ou ambos para a descontaminação de solos trazendo brevemente a respeito da fitominação e fitoextração de metais pesados (os autores citam mercúrio, potássio e magnésio). A seguir tratou-se do fato de que a utilização de plantas é ambientalmente amigável, tendo em vista que elas absorvem CO<sub>2</sub> e não necessitam do consumo de combustíveis fósseis para seu funcionamento, como muitos processos de descontaminação comerciais, além do custo mais reduzido caso as plantas sejam adaptadas a região e produzem biomassa que pode ser utilizada para outros fins.

Saier Jr. & Trevors (2010) trataram das duas principais desvantagens da fitorremediação: o tempo necessário para o crescimento das plantas e o potencial de perda por desastres naturais ou causados pelo homem. E trouxeram a pergunta do motivo que as plantas evoluíram para a hiperacumulação verificada em alguns casos, a resposta oferecida pelos autores foi de que a quantidade superior de metais, tóxicos ou não, causa os mais diversos organismos a não consumir a planta hiperacumuladora, sendo assim um mecanismo de defesa contra predadores. Seguindo pela apresentação do que impacta na efetividade da descontaminação do solo realizada por plantas: o grau de bioconcentração e a biomassa dos tecidos da planta onde são armazenadas as toxinas. Os autores finalizaram seu texto tratando de como existem testes de campo sendo realizados para verificação da efetividade de fitorremediação em campos de mineração altamente contaminados por metais pesados.

RASCIO & NAVARI-IZZO (2011) explicaram o motivo de plantas hiperacumuladoras captarem metais pesados do solo. O conteúdo do trabalho apresentado foi: o que são plantas hiperacumuladoras de metal pesado, como plantas realizam essa hiperacumulação (destrinchando entre captação de metal pesado, translocação raiz-brotos, desintoxicação/sequestro), porque plantas evoluíram para hiperacumular metais pesados

(contando com as hipóteses da “defesa elemental” e “efeitos das juntas”) e porque hiperacumuladores atraem tanta atenção (potencial de aplicação na fitorremediação, possibilidade de transferência de características para espécies com crescimento rápido por meio de engenharia genética e potencial de aplicação em fitomineração).

O trabalho de Ali *et al.* (2013) é iniciado com a apresentação do problema da poluição ambiental no mundo seguido pelo foco na poluição ocorrida por metais pesados e a divisão de tais metais entre sua utilização por organismos vivos (Ex.: Fe, Mn, Cu, Ni) ou não (Ex.: Cd, Pb, As, Hg). A seguir se trata das fontes de metais pesados no meio ambiente, que podem ser advindas de fontes antropogênicas (Ex.: mineração, uso de pesticidas) ou naturais (Ex.: erosão, atividades vulcânicas).

Metais pesados podem acarretar variados efeitos na saúde humana e Ali *et al.* (2013) ressalta a atenção especial que deve ocorrer no caso de contaminação de cadeias alimentares que resultaria na ingestão de tais metais (Quadro 4).

**Quadro 4.** Impacto de ingestão de elementos poluentes na saúde humana

<b>Elemento</b>	<b>Impacto na saúde humana devido a toxicidade</b>
Arsênico	Câncer de pele, hiperqueratose, hiperpigmentação, pé preto, erupções cutâneas, câncer interno órgãos
Cádmio	Disfunção tubular renal, proteinúria, glicosúria, aminoacidúria, doença <i>itai-itai</i>
Cromo	Disfunção renal, câncer de pulmão
Flúor	Calcificação dos ligamentos, osteosclerose, ossificação endocondral, espessamento de ossos chatos, osteomalácia e osteoporose
Chumbo	Encefalopatia (dano ao cérebro), falha na reprodução, distúrbio metabólico, déficit neurofísico em crianças, afeta o sistema hematológico e renal, anemia, hipertensão
Mercúrio	Danos ao sistema nervoso central, retardo mental e déficits neuromusculares em feto, gastroenterite grave, dor em queimação na boca, salivação, dor abdominal, vômito, colite, gengivite crônica e distúrbios mentais
Selênio	Sinais clínicos adversos persistentes desenvolvidos com morbidade de até 50%; perda de cabelo, deformidades nas unhas, selenose
Zinco	Interfere na reprodução, prejudica o crescimento do embrião

Retirado e traduzido de: Datta (2017). Com dados de: Oliver (1997); Gupta e Gupta (1998); Deckers e Steinnes (2004).

A seguir os autores evidenciaram a necessidade da limpeza de solos contaminados por metais pesados fornecendo dados a respeito de regiões contaminadas na Bélgica, Países Baixos e China e segue apresentando a definição de fitorremediação, a possibilidade de seu uso para remoção de metais pesados e radioisótopos e pontos positivos para o uso da técnica.

Os autores apresentam as técnicas e estratégias da fitorremediação - fitoextração, fitofiltração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, rhizodegradação e

fitodesalinização - resumidas no Quadro 6, seguidas pela apresentação das características que verificam a possibilidade de uma planta poder ser utilizada em fitorremediação: (1) alta taxa de crescimento, (2) produção de mais biomassa acima do chão, (3) sistema radicular bem ramificado e distribuído, (4) maior acumulação dos metais pesados do solo, (5) translocação dos metais pesados acumulados das raízes para os brotos, (6) tolerância aos efeitos tóxicos dos metais pesados, (7) boa adaptação para prevalecer as condições ambientais e climáticas, (8) resistência a pragas e patógenos, (9) fácil cultivo e colheita e (10) repulsão aos herbívoros para evitar contaminação da cadeia alimentar.

**Quadro 6.** Sumário das diferentes técnicas de fitorremediação.

Technique	Description
Phytoextraction	Accumulation of pollutants in harvestable biomass i.e., shoots
Phytofiltration	Sequestration of pollutants from contaminated waters by plants
Phytostabilization	Limiting the mobility and bioavailability of pollutants in soil by plant roots
Phytovolatilization	Conversion of pollutants to volatile form and their subsequent release to the atmosphere
Phytodegradation	Degradation of organic xenobiotics by plant enzymes within plant tissues
Rhizodegradation	Degradation of organic xenobiotics in the rhizosphere by rhizospheric microorganisms
Phytodesalination	Removal of excess salts from saline soils by halophytes

Retirado de ALI *et al* (2013).

Ali *et al* (2013) continuaram por tratar dos dois principais fatores que determinam o potencial fitorremediador de uma planta: (1) concentração de metal nos brotos e a (2) biomassa dos brotos, seguido pela apresentação de fatores críticos para possibilidade de fitorremediação de metais pesados no solo - a mobilidade e a biodisponibilidade - influenciados pela composição e propriedades do solo. A fitoextração de metais pesados pode ser realizada de duas maneiras - natural (ou continuada) ou induzida (ou quelada) - ocorrendo ou não, a adição de produtos no solo para melhoria de biodisponibilidade dos metais.

Os autores seguiram por apresentar o conceito de metalófitos - plantas que são especialmente adaptadas para prosperar em solos possuindo grande quantidade de metais. Tal tipo de planta apresenta 3 classificações: excludentes, indicadores e hiperacumuladores. Foi dado foco nos hiperacumuladores tendo em vista suas capacidades de fitorremediação e fitomineração de metais. Apresentou-se também a realidade da construção de pântanos para a fitorremediação, seguido da função de fitoquelatinas e metalotioneínas na fitoextração.

As limitações da fitorremediação - principalmente o tempo demorado para término do processo, eficiência limitada, assim como biodisponibilidade dos metais no solo, aplicabilidade

apenas em locais com contaminação leve ou moderada e o risco de contaminação da cadeia alimentar -, as tendências futuras e a natureza multidisciplinar do tema.

O trabalho de BOLAN *et al.* (2014) apresentou a remediação de solos contaminados com metais pesados/metaloides por meio da manipulação de sua biodisponibilidade no solo utilizando determinados corretivos no solo. Se trouxe que agentes mobilizadores (dessorção e quelação) podem ser utilizados para aprimorar a remoção de metais pesados e metaloides do solo por absorção de plantas enquanto agentes imobilizadores podem ser utilizados para reduzir a transferência de metais pesados e metaloides para cadeias alimentares.

No caso de mobilização os autores trouxeram como uma limitação majoritária é a suscetibilidade à lixiviação do metal pesado na ausência de absorção ativa da planta e no caso da técnica de imobilização, a estabilidade da mobilidade a longo-prazo deve ser monitorada devido à manutenção da concentração dos metais e metaloides presentes no solo.

Milčić *et al* (2019) trouxeram uma revisão a respeito da fitorremediação apresentando uma tabela com 7 espécies de plantas (*Heliandthus annuus*, *Pennisetum* sp., *Eichhornia crassipes*, *Linum usitatissimum*, *Brassica napus* L., *Populus* spp. e *Salix* spp.) e poluentes (Co, Cr [Cr, Cr27, Cr32], Zn [Zn, Zn28, Zn34], Pb [Pb, Pb44], Cd [Cd, Cd28, Cd29, Cd35], Cu, Clorobenzeno30, Fe, Ag, Ni [Ni33, Ni36], nitratos, TNT, hexogênio [RDX]41, PAH42 e PCB43) que são capazes de fitorremediar.

Os autores trouxeram como, devido a problemas passados, existia, ainda, muita necessidade de remediação e administração de poluentes, com foco em solos contaminados, sendo comentados meios de remoção de metais pesados e de poluentes orgânicos. Segue-se realizando uma apresentação a respeito de meios de aprimorar processos fitorremediativos (por adição de agentes quelantes, cinzas e zeólitos, surfactantes ou materiais orgânicos, variando de acordo com o objetivo desejado e situação do meio) e a respeito da existência de plantas transgênicas em processos de fitorremediação (com exemplo de usos de proteínas específicas das espécies *Nicotiana tabacum* e *Arabidopsis thaliana* para melhoria na decomposição de explosivos e degradação de TNT, respectivamente).

O trabalho de Wei *et al* (2020) foi apresentado como uma revisão da fitorremediação de contaminantes de ar, água e solo. Em seu trabalho, os autores revisaram a situação dos mecanismos de fitorremediação e parâmetros para poluição ambiental e descreveram a taxa de purificação de diferentes plantas para diferentes poluentes além dos métodos para aprimorar tais taxas de purificação. Para cada situação os autores trouxeram uma lista de espécies e tipo de poluidor que houve purificação. Para poluentes do ar foram trazidas 19 espécies de plantas capazes de fitorremediação, para poluentes da água foram trazidas 14 espécies e para poluentes

do solo, 13 espécies. Na situação da água os poluentes foram especificados entre elementos classificados como metais pesados (Hg, Pb, Cu, Cr, Fe, Cd), no caso do solo foram incluídos dois pesticidas (Atrazine e Triazophos) além de metais (Cobalto, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, As, Cr, Mn) e algumas substâncias (Policlorado bifenilos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) e na situação do ar foram delimitados entre propinoaldeído (Propanal), benzeno, n-hexano, formaldeído e tolueno.

#### **4.2 Algumas espécies de plantas utilizadas na fitorremediação durante 2010-2020**

As publicações retornadas pelas pesquisas para espécies específicas de plantas utilizadas em processo fitorremediativo foram de Landeros-Márquez *et al.* (2011), Pizarro *et al.* (2015) e Hernández-Valencia *et al.* (2017).

O trabalho de Landeros-Márquez *et al.* (2011) realizou uma verificação a respeito da capacidade fitorremediativa da planta *Acacia farnesiana* de solos, especificamente sobre a taxa de chumbo acumulada na planta em situação de área árida. Foi coletado um solo sem chumbo e adicionados, *ex situ*, chumbo em três concentrações diferentes (0/250/500 mg/kg) no formato Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> e quatro doses de nitrogênio (0/100/300/500 mg/kg). O solo foi avaliado em capacidade catiônica, condução de atividade elétrica, conteúdo de matéria orgânica, porcentagem de carbonatos e bicarbonatos, porcentagem de sódio trocável e taxa de absorção de sódio. As plantas utilizadas no trabalho foram germinadas em copos e depois transplantadas para potes que foram preenchidos com 7kg de solo. Duas semanas após o transplante foram adicionadas soluções aquosas de nitrato de chumbo e fosfonitrato.

Os resultados apresentados evidenciaram como as doses separadas de nitrogênio e chumbo não apresentaram diferença significativas nas taxas de absorção das plantas, porém a interação entre as concentrações causou diferenças na acumulação de chumbo nas folhas, caules e raízes. As maiores concentrações de chumbo no caule verificadas foram quando havia maior quantidade de chumbo no solo e menor quantidade de nitrogênio, as maiores concentrações de chumbo nas folhas verificadas foram em 500mg/kg de chumbo e 100mg/kg de nitrogênio no solo e para as raízes foi com 500mg/kg de chumbo e 300mg/kg de nitrogênio.

O trabalho de Pizarro *et al.* (2015) focou na recuperação de solos contaminados por cobre devido a atividades de mineração e seus rejeitos, tendo em vista que é a atividade econômica mais importante do Chile. Existia uma área de cerca de 5 hectares de terra que foi coberta por rejeitos de mineração com precipitação anual girando em torno de 240mm por ano,

o que se tornou condição favorável para a formação de água ácida que pode contaminar o solo e todo sistema de água local. A área estudada também apresentou altas taxas de erosão pelo vento, o que causa uma quantidade excessiva de partículas de matéria.

Para o estudo de Pizarro *et al* (2015) foram utilizadas 14 espécies de árvores, quatro de arbustos perenes e duas de herbáceas verificando as taxas de crescimento, sobrevivência, diâmetro da marquise e por fim, a concentração de cobre nos solos incluindo a espécie *Acacia saligna*. Foi realizada plantação em 2002 (tratamento A) e outra em 2004 (tratamento B), havendo 60 plantas no tratamento A e 15 no B, contando este com apenas três espécies. Nos resultados obtidos ressalta-se como a espécie *A. saligna* apresentou melhor resultado de fitorremediação na região Coquimbo porém não se pode concluir se a deveria ser utilizada apenas a espécie citada, tendo em vista que um mix de diferentes espécies auxilia na reconstrução e desenvolvimento florestal do sitio.

Hernández-Valencia *et al* (2017) realizou em seu estudo a fitorremediação de um solo contaminado com petróleo extra pesado utilizando um capim da espécie *Megathyrsus maximus* e verificando mudanças ao longo de 120 dias no teor total de hidrocarbonetos de petróleo e indicadores de atividade microbológica no solo. Houve avaliação em dois tratamentos, em solo contaminado com a espécie alvo e em solo contaminado sem a planta. Os resultados verificaram maior redução no teor de hidrocarbonetos no solo onde se encontrava o capim além de apresentar também a diminuição de hidrocarbonetos aromáticos e, quando havia a espécie estudada presente, hidrocarbonetos saturados. O tratamento com o capim apresentou mudanças para todos os indicadores bioquímicos e microbiológicos avaliados além de apresentar maior ou igual atividade microbiana no solo, enquanto no tratamento sem capim houve apenas mudanças nas atividades da enzima desidrogenase e no coeficiente metabólico.

### **4.3 PGPR e fitorremediação**

As publicações retornadas pelas pesquisas visando relação entre PGPR, microrganismos e melhoria em técnica fitorremediativa foram de Compant *et al.* (2010), Glick (2010), Hayat *et al.* (2010), Bulgarelli *et al.* (2012), Lundberg *et al.* (2012), Kumar *et al.* (2015a), Coninx *et al.* (2017) e Zand *et al.* (2020).

O trabalho de Compant *et al* (2010) tratou de bactérias que promovem o crescimento na rizo- e endosfera de plantas, envolvendo suas funções, meio de colonização, mecanismos envolvidos e perspectivas para utilização. Tendo em vista que associações entre bactérias e

plantas podem ter funções fundamentais no desenvolvimento do crescimento ou saúde de plantas, os autores trazem como as bactérias podem migrar para rizosfera e ao rizoplane (superfície das raízes) antes de apresentar efeitos benéficos, podendo também penetrar as raízes das plantas havendo possibilidade de locomoção às partes aéreas da planta, onde apresentam, geralmente, concentração bacteriana menor que na rizosfera. O trabalho trouxe os passos da colonização da planta e inspeciona os mecanismos conhecidos responsáveis pelas capacidades rizosféricas e endófitas.

O trabalho de Glick (2010) iniciou apresentando como uma grande quantidade de mortes no planeta ocorrem devido a poluição da água, ar ou solo e como o problema de eliminação de lixo tóxico ainda deve ser resolvido, fornecendo exemplos de situações nos EUA em 1993 e 1996. A seguir o autor inicia apresentação de organismos que possuem capacidades superiores de metabolização de substâncias tóxicas, dando foco a microrganismos e plantas e ressaltando como grande parte das substâncias orgânicas podem ser degradadas por enzimas produzidas naturalmente, entretanto, devem ser estabilizadas no solo (reduzindo assim sua biodisponibilidade), extraídas, transportadas e acumuladas nos tecidos das plantas ou transformadas em suas formas voláteis.

Grande parte das plantas que são efetivas na remoção de metais do solo apresentam pequena quantidade de biomassa e baixa taxa de crescimento, assim, o autor oferece a possibilidade da fitorremediação facilitada por bactérias, que podem promover a biodegradação de metais ou o crescimento da planta, oferecendo assim uma melhor capacidade fitorremediativa das plantas utilizadas no processo (GLICK, 2010).

O autor finaliza seu trabalho apresentando uma tabela com cerca de 46 tipos diferentes de bactérias que apresentam resultados positivos quando combinadas com determinada planta, otimizando assim o processo fitorremediativo.

O trabalho de Hayat *et al.* (2010) foi uma revisão sobre as bactérias benéficas ao solo e sua função na promoção de crescimento de plantas. Traz-se que as rizobactérias que beneficiam o crescimento de plantas, comumente referidas como PGPR são capazes também promover a melhoria da saúde de plantas ou crescimento de nódulos. Citou-se como os principais gêneros de cianobactérias que fixam nitrogênio pertencem aos grupos *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Allorhizobium*, *Sinorhizobium* e *Mesorhizobium*.

PGPR funcionam principalmente de três maneiras diferentes: sintetizando compostos particulares para plantas, facilitando a captação de certos nutrientes do solo ou reduzindo ou prevenindo doenças nas plantas (pela síntese de antibióticos, produção de cianeto de hidrogênio e/ou enzimas que degradam parede celular de fungos). Os autores ressaltam a ajuda das PGPR

na solubilização de nutrientes, aumento na resistência ao estresse, estabilização de agregados, estrutura e conteúdo de material orgânico do solo. (HAYAT *et al.*, 2010)

Bulgarelli *et al* (2012) revelaram a estrutura e meios de reunião para microbiota bacteriana que habitam nas raízes da espécie *Arabidopsis*. Tendo em vista que bactérias do solo conseguem se multiplicar de maneira benigna e modular o crescimento e desenvolvimento de plantas com implicações desde aumentar produtividade de cultivo à fitorremediação.

Os autores trouxeram descrição da metodologia para caracterizar e comparar comunidades de bactérias que habitam em solos e raízes, não revelando somente a função de células de plantas metabolicamente ativas, mas também em funcionalidades de paredes de células inertes na seleção de bactérias do solo para colonização de hospedeiro.

Os autores verificaram como as raízes da *Arabidopsis thaliana* crescidas em diferentes solos naturais sobre condições ambientais controladas são preferencialmente colonizadas por Proteobactérias, Bacteroidetes e Actinobactérias, e que cada filo bacteriano é representado por uma classe ou família dominante. Também trazem como o tipo de solo define a composição de comunidades bacterianas que habitam as raízes e o genótipo do hospedeiro determina os perfis ribótipos até uma extensão limitada.

Dentre os resultados encontrados os Bulgarelli *et al.* (2012) ressaltaram que a parede celular da planta parece fornecer fatores suficientes para montagem de aproximadamente 40% da microbiota bacteriana que habita as raízes da *Arabidopsis*, com um viés para Betaproteobactérias. Assim sendo, a sub-comunidade encontrada pode não ser específica para a espécie estudada, mas bactérias saprofíticas que seriam encontradas naturalmente em qualquer raiz de planta ou restos de plantas no solo testado. Em contraste, os autores trouxeram como a colonização de membros Actinobacterianos dependem de outros fatores de células ativas do hospedeiro.

A carta de Lundberg *et al* (2012) trouxe a definição do principal microbioma presente nas raízes da espécie *Arabidopsis thaliana*. Se baseando em como as relações entre microrganismos encontrados na rizosfera (área da raiz da planta) possuem diferentes interações com o macroorganismo presente, diferenciando, assim, agentes patógenos de relações mutualistas ou comensais.

Os autores reportaram o pirosequenciamento (uma técnica de sequenciamento de DNA) do gene bacteriano correspondente ao RNA ribossômico 16S de mais de 600 plantas da espécie *Arabidopsis thaliana* testando a hipótese de que a rizosfera da raiz e o comportamento da microbiota endofítica de plantas crescidas em condições controladas são suficientemente dependentes do hospedeiro para se manterem consistentes em diferentes tipos de solos e

estágios de desenvolvimento e suficientemente dependentes no genótipo do hospedeiro para variar entre *Arabidopsis* com relação de acessão consanguínea.

Foram descritas diferentes comunidades bacterianas em dois solos a granel com aspectos geoquímicos diferentes e em compartimentos da rizosfera e endofítico preparados das raízes crescidas nestes solos. Encontrou-se que as comunidades são fortemente influenciadas pelo tipo de solo. Os compartimentos endofíticos se caracterizaram pela sobreposição e baixa complexidade das comunidades que apresentaram enriquecimento em Actinobactérias e famílias específicas de outros filos, notavelmente Proteobactérias. Foi encontrada variação numérica em algumas bactérias ao longo de diferentes estágios de desenvolvimento da planta e genótipos.

O capítulo produzido por Kumar *et al.* (2015) tem o título de “*Role of PGPR in Soil Fertility and Plant Health*” ou “Papel das rizobactérias promotoras do crescimento vegetal na fertilidade do solo e na saúde vegetal”. O capítulo introduz com uma explicação a respeito dos métodos que as PGPR realizam com as raízes das plantas, que possibilitam uma melhor absorção dos nutrientes do solo por elas. Durante o capítulo os autores trazem a definição da rizosfera, das PGPR, as aplicações das PGPR, um possível mecanismo de interação ou fisiologia de interação entre plantas e micróbios, a significância de tais interações e concluem trazendo como as PGPR apresentam potencial sustentável para saúde das plantas e fertilidade do solo.

O trabalho de Coninx *et al.* (2017) trouxe a respeito de micorriza – associações entre fungos e determinadas raízes - e suas funções em processos de fitorremediação. Dentro do texto produzido, identificou-se os tipos de micorriza – classificados entre micorrizas arbusculares, ectomicorrizas, de orquídeas e ericóides – os custos e benefícios do tipo de associação, sua presença nos ecossistemas e aplicações práticas de fungos micorriza.

A partir do último tópico os autores destrincharam os temas fitorremediação de solos contaminados com metais pesados e fitorremediação de contaminantes orgânicos utilizando plantas micorrizas. No texto apresentado ressaltam-se os seguintes fatos apresentados: efeitos benéficos em casos de micorrização de plantas expostas a metais pesados, contando com o possível aumento de crescimento da planta, aumento na disponibilidade de metal no solo, aumento na transferência de metal do solo para raízes e a maior translocação das raízes para os brotos.

Os autores focaram em três principais situações tendo em vista sua participação na sobrevivência de plantas presentes em ambientes severos – Ectomicorrizas, micorrizas arbusculares e ericóides.

O trabalho de Zand *et al* (2010) tratou da aplicação de nanopartículas de dióxido de titânio para promover a fitorremediação de solo poluído com Cádmio com contribuição de inoculação PGPR. Os resultados do estudo demonstraram que em quantidades baixas ou moderadas de dióxido de titânio (até 500 mg/kg) podem ser combinadas com PGPR (*Pseudomonas fluorescens*) para promover a fitorremediação do Cádmio no solo via *Trifolium repens*, tendo sido realizados testes separados e em combinação verificando os efeitos no crescimento da planta, o acúmulo e absorção de Cd e o conteúdo de clorofila da planta.

O estudo trouxe que, no caso de combinação com PGPR e nanopartículas de titânio (TiO<sub>2</sub>), a maior taxa de absorção de Cd do solo foi quando adicionados 500 mg/kg de TiO<sub>2</sub> ao solo, contando com presença de PGPR, tal adição trouxe o aumento do crescimento da planta, de acumulação e absorção de Cd em solo contaminado.

#### **4.4 Fitorremediação de elementos específicos**

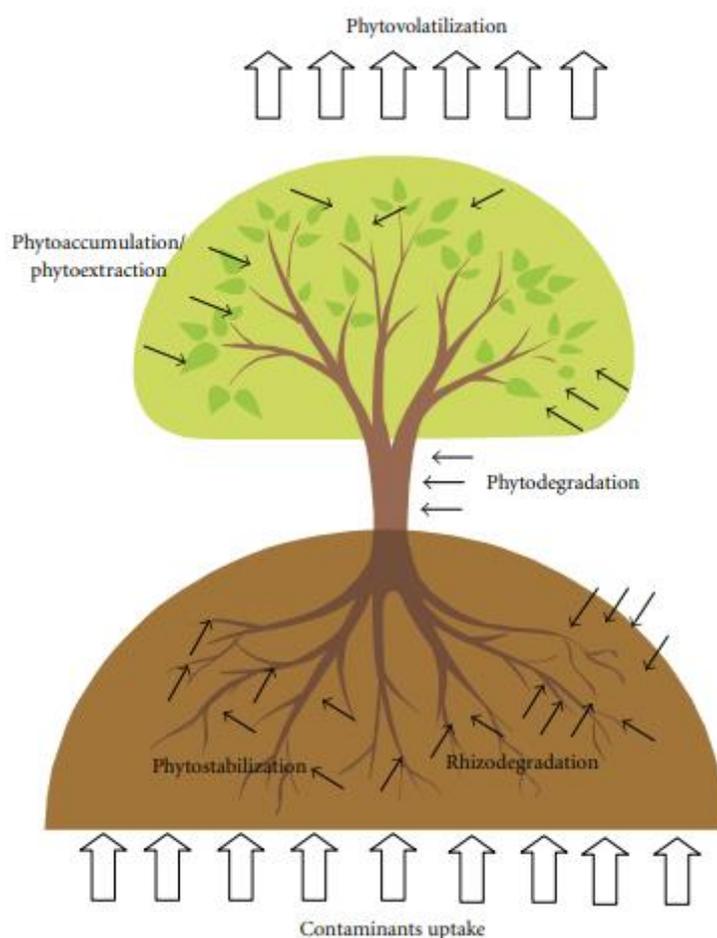
As publicações retornadas pelas pesquisas para fitorremediação de elementos específicos foram de Tangahu *et al.* (2011) e Liu *et al.* (2020).

O trabalho de Tangahu *et al* (2011) se iniciou pela apresentação de como metais pesados estão entre os contaminantes do meio ambiente e como já existem métodos de limpeza de metais, porém tais métodos são custosos e produzem grande quantidade de resíduos. Segue-se trazendo as fontes, efeitos e realizando uma breve descrição dos principais metais pesados contaminantes (As, Pb, Hg) no meio ambiente. Após a descrição, os autores continuam por apresentar as técnicas e processos principais de fitorremediação, sendo ressaltados a fitoextração e a fitoestabilização para contaminantes inorgânicos e a fitodegradação, rhizofiltração e rhizodegradação para contaminantes orgânicos.

Tangahu *et al* (2011) seguiu por trazer como Sinha *et al.* (2004) classificou plantas fitorremediadoras entre acumuladoras e excludentes, sendo o primeiro tipo sobrevivente mesmo concentrando contaminantes biodegradados ou biotransformados, em forma inerte, em seus tecidos aéreos, enquanto os excludentes restringem a absorção de contaminantes em sua biomassa. Seguido pela apresentação de mecanismos utilizados pelas plantas de absorção, transporte e armazenamento dos metais pesados, fazendo referência as plantas hiperacumuladoras, que possuem tais habilidades amplificadas centenas de vezes, citou-se também como o meio majoritário de armazenagem é no vacúolo das células. As plantas que absorvem metais pesados pela fitorremediação utilizam os mecanismos de fitoextração

(captação/absorção e translocação de contaminante pela raiz para a parte aérea da planta), fitoestabilização (para imobilização de contaminantes do solo e água e absorção e acumulação em seu organismo), Rhizofiltração (adsorção ou precipitação nas raízes da planta ou absorção e sequestro de contaminantes presentes na rizosfera da planta) e fitovolatilização (captação e transpiração de contaminantes pelas plantas, podendo ser liberados em sua forma original ou modificada, ocorrendo quando há captação de água junto com o contaminante) como apresentando na figura 1 (TANGAHU *et al*, 2011).

Figura 1 - Os mecanismos de absorção de metais pesados por plantas através de tecnologia fitorremediativa.



Fonte: TANGAHU *et al* (2011).

Dentre os fatores que afetam os mecanismos de absorção Tangahu *et al* (2011) ressaltam a espécie da planta, as propriedades do meio, a zona das raízes, a absorção vegetativa e a adição de quelantes.

Os autores trouxeram como os pontos positivos da fitorremediação se apresentam em ser: esteticamente agradável, menos perturbadora que técnicas atuais, a efetividade na redução dos contaminantes, de baixo custo, aplicabilidade para uma grande quantidade de contaminantes e ambientalmente amigável. Enquanto os pontos limitantes da tecnologia encontrados foram: é um método que consome tempo, a biomassa produzida, a profundidade das raízes, a química dos solos, o nível de contaminação, a idade das plantas, a concentração dos contaminantes, os impactos da vegetação contaminada e as condições climáticas. Os autores concluíram trazendo como há necessidade de pesquisa continuada na tecnologia e a necessidade de consideração de diversos fatores para uma fitorremediação de alta performance.

No trabalho de Liu *et al* (2020) foi dado foco na tecnologia existente de fitorremediação de mercúrio (Hg) do solo. Iniciou-se a publicação apresentando o elemento como um dos mais perigosos poluentes ambientais existentes em diversas concentrações ao redor do planeta, a partir de tal premissa os autores realizaram revisões bibliográficas buscando espécies de plantas que possuam habilidade de hiperacumular Hg.

Em sua revisão os autores apresentam como fatores principais para fitorremediação de solos contaminados com Hg a espécie da planta utilizada, as propriedades do solo, as condições climáticas e a biodisponibilidade e heterogeneidade do Hg no solo. Trouxe-se também como as substâncias iodeto de potássio, composto (produto de compostagem), sulfato de amônio, sulfito de sódio, tiosulfato de sódio, ácido clorídrico e enxofre fertilizante promovem absorção de Hg pelas plantas, além de tratar também de alguns microrganismos da rizosfera que podem aumentar a mobilidade de Hg no solo, sendo assim beneficiária para a fitorremediação.

Como produto do trabalho houve apresentação de 16 espécies que demonstraram algum efeito válido de acumulação de Hg considerando 18 situações diferentes de aceleradores químicos, além de apresentar 7 genes de 5 espécies diferentes de plantas transgênicas que influenciam na acumulação de Hg pela planta.

#### **4.5 Outros pontos observados a respeito da fitorremediação durante a pesquisa**

As publicações retornadas pelas pesquisas que não se encaixaram entre os outros temas foram: Kadukova & Kalikova (2010), Chalot *et al.* (2012), Gomez *et al.* (2018), Praveen & Padney (2019) e Zhang *et al.* (2020).

O livro de Kadukova & Kavulicova (2010) se dividiu principalmente em cinco capítulos: *Phytoremediation, Stress Physiology, Metal Stress, Stress Evaluation e Conclusion.*

No primeiro capítulo as autoras apresentam a fitorremediação e suas técnicas - ressalta-se aqui a apresentação das técnicas *phytotransformation* (fitotransformação - a degradação total ou parcial de moléculas orgânicas complexas ou sua incorporação aos tecidos da planta), *removal of aerial contaminants* (remoção de contaminantes aéreos - absorção de vários orgânicos voláteis pelas folhas), *dendroremediation* (dendrorremediação - o uso de árvores para evaporar água e extrair poluentes do solo) e *hydraulic control* (controle hidráulico - o controle da tabela de água e da capacidade do solo do campo por copas de árvores), que não haviam sido mencionadas até este estudo.

Para as principais técnicas da fitorremediação as autoras trazem estudos de caso: para fitoestabilização, três estudos, no Guadiamar River Valley e em Sanlúcar la Mayor na Espanha e em Torviscosa na Itália; para fitoextração, dois estudos realizados no Reino Unido, dois na França, um na Rússia, um na China e um na Bélgica; para fitomineração, um no Brasil, um na Albânia e um na Itália.

Os capítulos 2 a 4 trazem o essencial do livro que é a respeito do estresse sentido pelas plantas, o estresse ocorre quando existem fatores de estresse afetando o organismo. As autoras (KADUKOVA & KAVULICOVA, 2010) definem fatores de estresse como diferentes efeitos do ambiente que seriamente colocam as plantas em perigo.

O livro trouxe motivos que causam estresse nas plantas e reações ao estresse (produção de hormônios, proteínas, acumulação de osmólitos, formação de *phytochelatins* e *metallothioniens*, redução e estimulação de sistemas antioxidantes, influencia no sistema fotossintético ou redução do crescimento), continuando por uma avaliação geral na germinação sofrendo estresse, apresentação de variação nos pigmentos fotossintéticos em caso de estresse, a indução nas atividades de enzimas antioxidantes e a respeito das próprios antioxidantes e finaliza os capítulos tratando das *Phytochelatins*.

O livro foi concluído fazendo uma breve revisão geral e ressaltando os pontos principais de germinação, crescimento da planta e produção de biomassa, a respeito dos níveis de pigmentos fotossintéticos, a respeito da atividade enzimática, antioxidantes não-enzimáticos e a *Phytochelatins*.

O trabalho de Chalot *et al.* (2012) se iniciou com uma apresentação da contaminação de oligoelementos do solo nos EUA e a necessidade do conhecimento sobre o que ocorre em casos de uso de biomassa (neste caso, madeira) contaminada com tais elementos para produção de energia. Os autores trouxeram como estudo a descrição de um método para prever o destino de oito oligoelementos (As, Cd, Hg, Ni, Pb, Se, V e Zn) e apresentaram os valores, porcentagens

e destinos dos oligoelementos após a queima de madeira referência e madeira provida de processo fitorremediativo, com filtro de cinzas e sem filtro de cinzas.

A seguir o trabalho apresenta a caldeira industrial utilizada para realização do método, a coleção de madeira e suas propriedades, as frações dos oligoelementos coletados, a determinação dos parâmetros analíticos e dos conteúdos dos oligoelementos. Dentre os resultados obtidos ressaltam-se os parâmetros de combustão medidos, as concentrações dos oligoelementos na madeira referência e na madeira de fitorremediação, o destino dos principais oligoelementos nas variadas cinzas e emissões.

Os autores concluíram ressaltando a necessidade de diretrizes orientando um meio de utilização de tais cinzas de madeiras incineradas, exemplificando o realizado na Alemanha (manufatura de fertilizantes) e na Áustria (compostagem), também apontando a necessidade de cuidado com os limites nos valores dos oligoelementos e de como podem ser nocivos a diversos organismos dependendo de suas concentrações e especificidades.

O trabalho de GOMEZ *et al* (2018) tratou a respeito de fitorremediação utilizando árvores, sendo iniciado pelas vantagens e desvantagens do uso dos métodos seguido pela justificativa do uso de árvores considerando os benefícios globais, características especiais de árvores para fitorremediação e serviços ambientais adicionais, caracterização do uso de árvores na fitorremediação incluindo poluição elemental, orgânica e meios de aprimorar capacidades endógenas. E terminando por apresentar como ainda há necessidade de estudo continuado a respeito de diferentes interações entre plantas e poluição e seus impactos nas diferentes espécies de plantas utilizadas em processos fitorremediativos.

Ressaltou-se como devem existir espécies de plantas ainda não estudadas que podem apresentar características ideais para fitorremediação (pioneira, com crescimento rápido, alta transpiração, raízes grandes, tolerância natural à poluição e estresse e possuindo também valores econômicos e ecológicos).

Tratou-se também de como tecnologia fitorremediativa apresenta consenso geral de que é uma tecnologia que tem potencial prático imenso e é bastante desconhecida mesmo entre especialistas e pessoas diretamente envolvidas em seleções de tecnologias de remediação.

Praveen & Pandey (2019) trouxeram a respeito do papel das pteridófitas dentro da fitorremediação. Os autores trazem uma tabela de 24 espécies de pteridófitas que acumulam arsênio, benefícios e limitações da fitorremediação, outra tabela com 21 espécies de pteridófitas identificadas para fitorremediação de metais pesados e metaloides e concluem seu estudo trazendo como há necessidade de remediação de metais pesados em solo e águas e como as

pteridófitas evoluíram de forma a possuírem grande quantidade de espécies adequadas para uso em processos fitorremediativos.

Os autores ressaltaram a importância das pteridófitas quando comparadas com a família Brassicaceae das Angiospermas, o outro ramo de espécies que apresentam maior quantidade de espécies aptas para realização de fitorremediação, tendo em vista que as pteridófitas não possuem tanta importância econômica e não sendo frequentemente utilizadas na alimentação, atendendo especificações para possibilidade de uso na técnica abordada. Os autores também trazem como a característica da defesa antioxidante das pteridófitas auxiliam na manutenção do equilíbrio entre os metais pesados absorvidos e os tecidos da planta, auxiliando na saúde da planta.

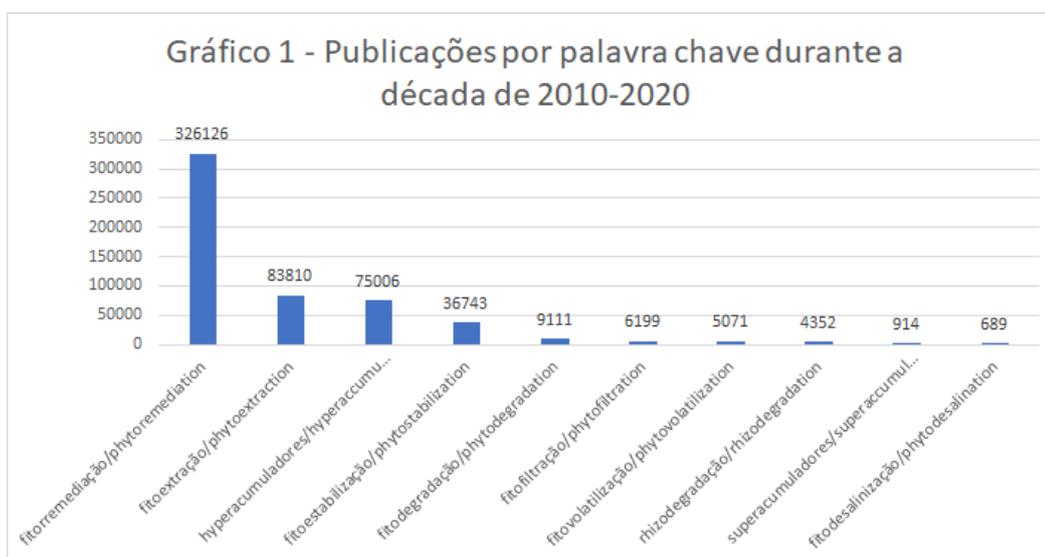
Zhang *et al* (2020) trouxeram em sua publicação como a poluição do ar é um ponto que merece mais atenção e traz o método da fitorremediação como uma opção de limpar o ar poluído com um baixo custo e possui alguns outros pontos positivos que evidenciam e explicam a efetividade do método.

Os autores concluíram sua publicação ressaltando pontos onde devem ocorrer mais estudos para verificar a capacidade de fitorremediação do ar, dentre eles ressaltam-se: identificação de associações microbiais em folhas de plantas e seu processo de degradação de poluentes, investigação do processo bioquímico incluindo absorção de poluentes do ar e metabolismo nas plantas, investigação de processos fisiológicos e mecanismos na fisiologia, anatomia e mudanças genéticas das folhas das plantas, seleção ou construção de espécies mais eficientes na degradação de poluentes do ar via biotecnologia, desenvolvimento de nova tecnologia para compreender a utilização de plantas fitorremediadoras do ar e determinação de quais tipos de poluição do ar podem ser efetivamente reduzidos pela aplicação de fitorremediação do ar e se os benefícios são suficientes para justificar maiores pesquisas ou planejamentos.

#### **4.6 Resultados gerais obtidos**

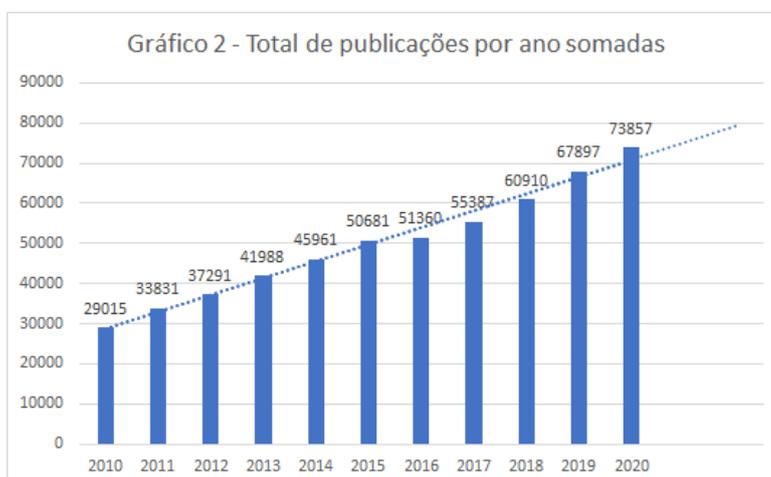
Demonstrado no Gráfico 1 tem-se uma apresentação quantitativa dos títulos encontrados para cada dupla de palavras-chave (português e inglês). Observa-se claramente a grande quantidade para fitorremediação/*phytoremediation* tendo em vista que as outras palavras-chave são técnicas ou métodos provenientes de tal, com exceção de hiperacumuladores/*hyperaccumulators* e superacumuladores/*superaccumulators*. Observou-

se como os estudos vêm apresentando maior foco em fitoextração e fitoestabilização que as demais técnicas e métodos pesquisados, infere-se que tal ocorrido se dá devido ao foco em fitorremediação de solos e de metais pesados (como observado nas publicações de SAIER JR. & TREVORS, 2010; GLICK, 2010; HAYAT *et al.*, 2010; LANDEROS-MÁRQUEZ *et al.*, 2011; RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011; TANGAHU *et al.*, 2011; ALI *et al.*, 2013; BOLAN *et al.*, 2014; PIZARRO *et al.*, 2015; VALENCIA *et al.*, 2017; GOMEZ *et al.*, 2018; MILČIĆ *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020) na década pesquisada, verificado ao longo deste estudo.



Elaborado pelo autor.

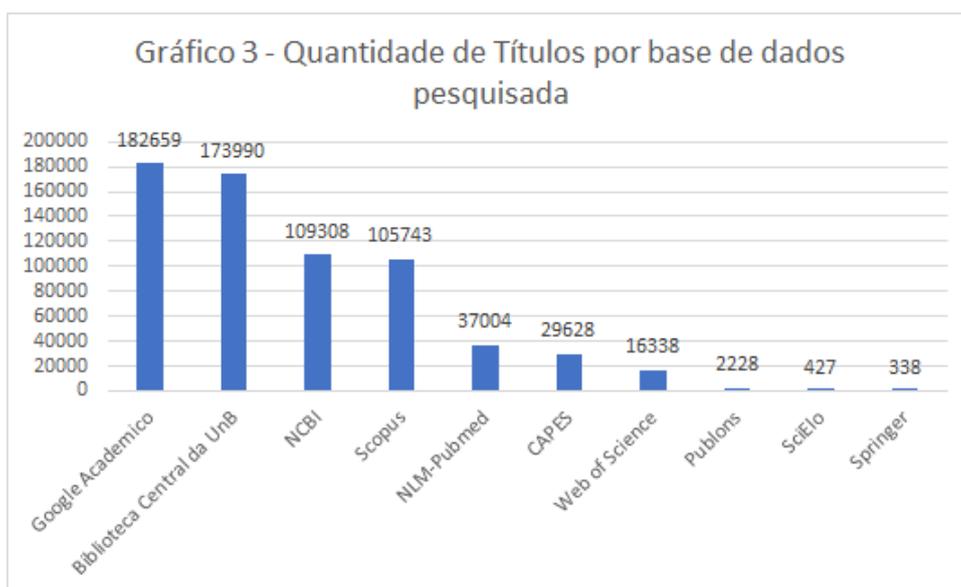
O Gráfico 2 demonstra a quantidade de títulos encontrados por ano ao longo da pesquisa. Verifica-se claramente, com ressalva para os anos de 2016 e 2017, o crescimento contínuo de publicações ao longo da década de 2010-2020. A linha de tendencia presente demonstra como nos próximos anos, se mantido a taxa de crescimento na quantidade de publicações/ano, espera-se atingir cerca de 80.000 publicações por ano.



Elaborado pelo autor.

Dentre as bases de dados, editoras e diferentes plataformas pesquisadas verificou-se a maior quantidade de títulos encontrados no Google Acadêmico, seguido pelo repertório da Biblioteca Central da Universidade de Brasília (Gráfico 3). Em ambos os casos há a possibilidade de repetição de títulos publicados, o que não surpreende suas posições como detentores das maiores quantidades de títulos.

A menor quantidade de títulos encontrados (Gráfico 3) sendo na plataforma da Springer se explica pela existência de apenas livros publicados no repertório pesquisado. A situação da plataforma da SciELO tendo demonstrado a segunda menor quantidade de dados se explica pela baixa quantidade de pesquisa feita na área de fitorremediação na América Latina e países envolvidos com a SciELO, se tratando de uma tecnologia relativamente nova e com necessidade de abordagem multidisciplinar.



Elaborado pelo autor.

As Tabelas 19 e 20 evidenciam a desigualdade na quantidade de pesquisa sendo publicada nos idiomas português e inglês, explicado pelo conhecimento comum de que grande parte das editoras e revistas internacionais cumprem normas de publicação visando um padrão. Tal padrão seguindo determinadas normas de escrita, estrutura de textos, linguagem e preferencialmente idioma Inglês.

Tabela 19 - número total de títulos/ano/palavra-chave – Português

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década	
fitoextração	101	93	70	101	115	115	125	121	140	128	90	1199		1252
fitofiltração	1	1	4	3	6	5	6	5	4	4	2	41		41
fitoestabilização	43	80	50	50	80	68	88	81	99	73	54	766		825
fitovolatilização	17	17	15	16	33	17	32	24	31	31	18	251		251
fitodegradação	19	20	21	19	34	20	30	24	35	34	25	281		281
rhizodegradação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
fitodesalinização	0	0	0	0	2	1	2	1	2	0	2	10		10
fitorremediação	321	368	328	400	353	378	473	497	475	503	380	4476		4035
superacumuladores	0	1	1	0	1	1	0	0	1	2	1	8		8
hyperacumuladores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
total	502	580	489	589	624	605	756	753	787	775	572			6703

Elaborado pelo autor.

Obs.: A coluna “mostrado na pesquisa da década” faz referência à pesquisa única realizada na década, que apresenta valores diferentes quando pesquisado cada ano individualmente, principalmente na plataforma do Google Acadêmico, explicando os resultados totais divergentes.

Tabela 20 - número total de títulos/ano/palavra-chave – Inglês

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	mostrado na pesquisa da década	
phytoextraction	4413	5071	5797	6361	7167	7975	7629	8397	9131	9933	10737	82611		79006
phytofiltration	324	456	421	460	599	588	596	716	681	654	663	6158		6246
phytostabilization	1432	2030	2319	2518	3299	3276	3413	4119	4232	4441	4898	35977		41233
phytovolatilization	203	282	288	359	373	452	462	539	536	548	778	4820		4997
phytodegradation	426	592	553	711	757	886	854	1046	939	1041	1025	8830		9006
rhizodegradation	140	238	247	343	382	305	432	520	487	512	746	4352		4589
phytodesalination	21	4	14	21	47	47	91	55	78	149	152	679		788
phytoremediation	17230	19694	21918	24155	26200	29061	30192	32015	35588	40940	44657	321650		348361
superaccumulators	33	22	46	54	82	91	93	102	111	131	141	906		2021
hyperaccumulators	4291	4862	5127	6328	6431	7396	6843	7125	8340	8773	9490	75006		65541
total	28513	33251	36730	41310	45337	50077	50605	54634	60123	67122	73287			561788

Elaborado pelo autor.

Obs.: A coluna “mostrado na pesquisa da década” faz referência à pesquisa única realizada na década, que apresenta valores diferentes quando pesquisado cada ano individualmente, principalmente na plataforma do Google Acadêmico, explicando os resultados totais divergentes.

A Tabela 21 apresenta o crescente número de publicações a respeito das palavras-chave pesquisadas. Ressalta-se como foi reportado crescimento contínuo ao longo de todos os anos para o total de títulos encontrados somados, como a fitoextração a fitoestabilização e trabalhos a respeito de hiperacumuladores foram os principais focos da comunidade acadêmica pesquisada durante a década alvo. Ressalta-se como para todas as palavras-chave, em geral, foi verificado um crescimento constante no número de publicações/ano.

Desconsiderando as palavras-chave fitorremediação e *phytoremediation*, ainda foi observado um crescimento constante na área pesquisada, com exceção do ano de 2016, para o qual não foi encontrado motivo de redução do número de publicações.

Tabela 21 - número de títulos somados/ano/palavras-chave – Total

palavra-chave/ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	total mostrado	
fitoextração/phytoextraction	4514	5164	5867	6462	7282	8090	7754	8518	9271	10061	10827	83810		80258
fitofiltração/phytofiltration	325	457	425	463	605	593	602	721	685	658	665	6199		6287
fitoestabilização/phytostabilization	1475	2110	2369	2568	3379	3344	3501	4200	4331	4514	4952	36743		42058
fitovolatilização/phytovolatilization	220	299	303	375	406	469	494	563	567	579	796	5071		5248
fitodegradação/phytodegradation	445	612	574	730	791	906	884	1070	974	1075	1050	9111		9287
rhizodegradação/rhizodegradation	140	238	247	343	382	305	432	520	487	512	746	4352		4589
fitodesalinização/phytodesalination	21	4	14	21	49	48	93	56	80	149	154	689		798
fitorremediação/phytoremediation	17551	20062	22246	24555	26553	29439	30665	32512	36063	41443	45037	326126		352396
superacumuladores/superaccumulators	33	23	47	54	83	92	93	102	112	133	142	914		2029
hyperacumuladores/hyperaccumulators	4291	4862	5127	6328	6431	7396	6843	7125	8340	8773	9490	75006		65541
total	29015	33831	37219	41899	45961	50682	51361	55387	60910	67897	73859			568491
total desconsiderando fitorremediação/phytoremediation	11464	13769	14973	17344	19408	21243	20696	22875	24847	26454	28822	221895		216095

Elaborado pelo autor.

Obs.: A coluna “total mostrado” faz referência à pesquisa única realizada na década, que apresenta valores diferentes quando pesquisado cada ano individualmente, principalmente na plataforma do Google Acadêmico, explicando os resultados totais divergentes.

Foi observado o crescente número de títulos publicados ao longo dos anos pesquisados (Tabela 22), houve alguma queda em algumas palavras-chave nos anos 2015 ou 2016 em geral, em alguns momentos, porém não foi identificado o motivo de tal queda. As quantidades totais de títulos encontrados (Gráficos 1 e 2, Tabelas 22, 23, 24 e 25) não são as quantidades reais de títulos publicados devido as repetições verificadas dentre as diferentes plataformas pesquisadas, foram contabilizados os títulos apenas para análises quantitativas comparativas realizadas durante este trabalho e somados das diferentes bases de dados, desconsiderando tal repetição.

Como disponível na Tabela 22, o único caso de variação na quantidade de títulos publicados anualmente foi na SciELO. Não foi encontrado motivo específico para tal variação.

Tabela 22 - número de títulos/ano/base de dados pesquisadas

total de publicacoes por ano por base de	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total
CAPEs	1611	1731	2479	2798	3005	3452	2605	2623	3224	3164	2936	29628
Google Academico	9418	10459	12147	13747	15158	16521	17389	19162	19972	22668	26018	182659
SciELO	44	67	27	27	34	25	45	50	47	35	26	427
Biblioteca Central da UnB	8560	11044	11407	13109	14875	16603	16244	17569	19855	22290	22434	173990
NCBI												109308
NLM-Pubmed	2731	2864	2942	3112	3113	3277	3498	3372	3621	4084	4390	37004
Scopus	5708	6583	6997	7855	8444	9212	9993	10865	11959	12915	15212	105743
Springer												338
Publons	59	71	70	88	86	89	85	114	418	551	597	2228
Web of Science	884	1012	1150	1163	1246	1502	1501	1632	1814	2190	2244	16338
Total	29015	33831	37219	41899	45961	50681	51360	55387	60910	67897	73857	

Elaborado pelo autor.

Em branco - dados não contabilizados devido a se repetirem (dados do NCBI de repetem no NLM-Pubmed) ou não demonstrar a diferenciação por ano nas pesquisas realizadas (Springer)

Obs1.: O baixo número de publicações da base Publons se dá devido a impossibilidade da contagem da palavra chave "*phytoremediation*" antes de dezembro de 2018 devido à limitação de 1500 resultados a serem expostos na página de pesquisa.

Obs2.: O número de publicações no NCBI e Springer é total de todas as publicações da plataforma além de contabilizar por todos os anos, ambas não apresentaram opção de realização de publicações/ano.

Dentro dos trabalhos revisados foi observado o desenvolvimento da biblioteca dos diferentes hiperacumuladores e microrganismos simbióticos que auxiliam ou amplificam processos fitorremediativos em plantas ao longo da década pesquisada. Um exemplo é encontrado no trabalho de Lundberg *et al.* (2012), onde é feita a definição do microbioma encontrado nas raízes da planta *Arabidopsis thaliana*, que foi verificado que o solo em que a planta se encontra influencia drasticamente nos microrganismos presentes em determinado microbioma.

Ao longo da década existe busca no desenvolvimento das relações entre microrganismos rizosféricos e plantas fitorremediadoras com adições de elementos aos ambientes presentes, como exemplo temos a adição de nanopartículas de dióxido de titânio visando inoculação de

PGPR (ZAND *et al.*, 2020). Outros pontos que apresentaram desenvolvimento ao longo na década foram a respeito do entendimento da relação entre micorrizas e plantas fitorremediadoras (CONINX *et al.*, 2017) e a definição de bactérias e fungos a serem utilizados como organismos modelo na demonstração de influência na saúde de plantas (KUMAR *et al.*, 2015a, cap.12, p.252) assim como determinadas espécies de plantas (Ex.: *Thlaspi caerulescens*) visando a hiperacumulação de metais pesados em plantas (RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011).

Em casos de contaminação do solo existem diversos riscos que devem ser mensurados para evitar uma situação mais problemática (MORAES *et al.*, 2014). Como exemplo, cita-se o caso de contaminação de solos voltados para agricultura no Vietnã (KIEN *et al.*, 2010) e de produtores de arroz na China por contato com solo contaminado por metal pesado (SU, 2014) que já possuem situação necessitada de atenção há vinte anos, ressaltando a importância de remediação de solos contaminados por metais pesados.

A respeito do desenvolvimento das tecnologias fitorremediativas, foi verificado também alguma exploração a respeito do uso de árvores em tais técnicas (GOMEZ *et al.*, 2018) assim como a especificação evidenciada por Praveen & Padney (2019) a respeito das pteridófitas e seu papel na fitorremediação, possuindo diversas plantas que possuem pouca importância comercial, não sendo comestíveis, apresentando capacidade antioxidante e espécies herbáceas de crescimento rápido as tornando possíveis alvos para participação em processos de fitorremediação.

Outro exemplo claro do desenvolvimento das tecnologias fitorremediativas foi evidenciado comparando revisões de Ali *et al.* (2013) e Yan *et al.* (2020), onde se observa a repetição de pontos fundamentais (fitoestabilização, fitoextração, fitovolatilização, fitofiltração, a respeito da biodisponibilidade de metais no solo e alguns meios de aumentá-la, a respeito de engenharia genética dos micro/organismos envolvidos no processo e a utilização de quelantes e micróbios visando melhoria na performance do processo) e se verificou como os trabalhos apresentam, de forma geral, os mesmos pontos, havendo desenvolvimento apenas em pontos específicos dentro do citado anteriormente. Com duas ressalvas, uma para fitorremediação de materiais orgânicos ou inorgânicos, observou-se como ao início da década havia um maior foco no uso do conjunto de técnicas para situações apenas com metais pesados e como ao fim dela a utilização da técnica já se expandiu para remediação também de materiais in/orgânicos. A segunda ressalva sendo a respeito das *Plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPR), onde ao início da década havia ainda necessidade de pesquisa visando a compreensão do funcionamento de tais microrganismos e seus efeitos adversos na biodisponibilidade de elementos (GLICK, 2010) e ao final da década haviam já sido definidos modelos para utilização

de PGPR em fitorremediação (KUMAR *et al.* 2015a, cap.12), além do entendimento dos pontos em que tais microrganismos auxiliam em processos fitorremediativos.

Ressalta-se aqui o desenvolvimento da tecnologia na área, observável a partir dos textos referenciados, visando a otimização das capacidades de técnicas fitorremediadoras, ao menos do solo e em alguns casos, da água. Além do crescimento da biblioteca de plantas que apresentam potencial hiperacumulador de algum tipo de metal pesado e grandes avanços na biblioteca e no entendimento de microrganismos rizosféricos visando amplificação das capacidades das técnicas de fitorremediação.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho teve como objetivo a apresentação dos principais títulos a respeito de organismos hiper/superacumuladores visando sua utilização em processos fitorremediativos, principalmente em solos contaminados por metais pesados em sítios de mineração de superfície abandonados publicados na década de 2010-2020. A partir das pesquisas realizadas e dados coletados observou-se, no período pesquisado, uma crescente e ampla extensão a respeito de estudos de fitorremediação, onde foi demonstrado foco a respeito do conjunto de técnicas mais voltados para a remediação de solos (fitoextração e fitoestabilização) contaminados com metais pesados, seguido por estudos a respeito de tecnologias visando a melhoria dos meios de fitorremediação de solo amplificando as capacidades, eficiência ou efetividade de organismos ou simbioses. Ressalta-se aqui os estudos tratando a respeito de fitorremediação realizados com sucesso em resíduos ou solos contaminados provenientes de atividade mineradora de superfície de minério de ferro, cobre ou zinco (PIZARRO *et al.*, 2015; ALBUQUERQUE *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017; BANERJEE *et al.*, 2019; EL RASAFI *et al.*, 2020).

Foram encontrados estudos tratando a respeito desde teorias a respeito da razão pela evolução das plantas consideradas superacumuladoras (RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011) até definição de microbioma rizosférico de determinada espécie (LUNDBERG *et al.*, 2012) e as mais complexas simbioses (CONINX *et al.*, 2017) evidenciando possibilidades para engenharia genética visando o aprimoramento de micro/organismos utilizados em fitorremediação. Houve parte dos estudos revisados que foram revisões em si, o que traduz em uma grande e crescente biblioteca existente a respeito dos mais diversos organismos e simbioses disponíveis visando remediação de solo, água e ar de elementos considerados contaminantes.

Tendo em vista a problemática de poluição e contaminação em diferentes ambientes no planeta existente devido a atividades humanas, o conjunto de técnicas apresentado pela tecnologia da fitorremediação vem como uma opção ecologicamente amigável, culturalmente aceita, de custo reduzido quando comparada a outras técnicas remediativas e ambientalmente recomendada devido a alguns fatores mencionados anteriormente. O conjunto das técnicas expostas ao longo deste trabalho tem sua importância ressaltada devido às questões ambientais trazidas à tona desde a década de 90, onde muitos pontos ainda não resolvidos ou deficientes necessitam de mais atenção para possível mitigação de impactos ambientais causados por atividades humanas.

As tecnologias fitorremediativas possuem pontos limitantes como a extensão da remediação (limitada pela extensão do alcance dos organismos envolvidos), médio a longo período de tempo necessário para completude do processo (limitado pela biomassa dos organismos envolvidos, taxas de absorção, captação e pela biodisponibilidade dos elementos contaminantes), riscos de contaminação de cadeia alimentar e sua não aplicabilidade em ambientes com alta taxa de contaminação. Porém também possui pontos positivos sendo: viabilidade econômica, possível redução a exposição de poluentes ao meio ambiente e ecossistema, possibilidade de aplicação em grande escala, evita erosão e lixiviação metálica além de poder melhorar a fertilidade do solo (YAN *et al.*, 2020).

A respeito da utilização das técnicas apresentadas, foram apenas encontrados durante a pesquisa casos onde foi realizada fitorremediação visando atingir algum produto de pesquisa, em outras palavras, as técnicas não foram observadas sendo utilizadas em casos onde não há pesquisa, demonstrando pouca dispersão do conhecimento das técnicas dentro de empresas, pessoas responsáveis por escolha de processos de remediação e especialistas em meio ambiente (GOMEZ *et al.*, 2018) para utilização em processos rotineiros ou frequentes. Assim sendo, há necessidade de divulgação da técnica para o público buscando o maior conhecimento da existência do conjunto de técnicas, trazido ao longo do trabalho de Gerhardt *et al.* (2017), onde se conclui que deve ser realizado foco em estudos de campo de longo prazo, com ressalva para não ocorrer “overselling” das técnicas, não realizando uma propaganda exorbitante devido às limitações das capacidades da fitorremediação.

Verificou-se como desde o início da década pesquisada até o fim do ano de 2020 os estudos a respeito dos diferentes organismos que realizam melhoria na eficiência ou eficácia em técnicas fitorremediativas foram gradativamente realizados, ampliando assim o entendimento a respeito da biodisponibilidade de metais pesados no solo, especificamente, e trazendo listas com os mais diversos elementos, microrganismos ou organismos que auxiliam

nos processos estudados. Além dos avanços nos pontos citados, o trabalho de GOMEZ *et al.* (2018) traz como para fitorremediação utilizando árvores o Gênero *Populus* vem sido bastante estudado e demonstra ser tanto um sistema modelo quanto uma árvore virtualmente ideal para uso em fitorremediação.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Dentre os títulos revisados foram encontradas diversas recomendações para futuros estudos, ressaltaram-se:

- A busca pelo melhor entendimento dos processos envolvidos na captação, transporte, acumulação e resistência de organismos envolvidos em processos fitorremediativos (CHERIAN *et al.*, 2005; LEDUC & TERRY, 2005; COMPANT *et al.*, 2010; RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011; KLOS *et al.*, 2012; ALI *et al.*, 2013; TAVARES *et al.*, 2013; BOLAN *et al.*, 2014; CONINX *et al.*, 2017; DATTA *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017; GOMEZ *et al.*, 2018; WANI *et al.*, 2018; MILČIĆ *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020).
- Uma aproximação transdisciplinar de fitorremediação se baseando em dezenas de disciplinas visando aplicações em larga escala (ALKORTA *et al.*, 2004; ALI *et al.*, 2013; DATTA *et al.*, 2017; WANI *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2020;).
- Exploração na diversidade de plantas existentes buscando hiperacumuladores eficientes na fitorremediação de metais pesados ou diferentes contaminantes (CHERIAN *et al.*, 2005; RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011; ALI *et al.*, 2013; PIZARRO *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017; WANI *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).
- Estudos de avaliação de risco devem ser realizados antes da aplicação de plantas transgênicas na fitorremediação (GLICK, 2010; ALI *et al.*, 2013; GOMEZ *et al.*, 2018).
- Desenvolvimento de plantas, transgênicas ou não, com interações planta-microrganismos na rizosfera amplificando as capacidades fitorremediativas dos organismos envolvidos (CHERIAN *et al.*, 2005; LEDUC & TERRY, 2005; COMPANT *et al.*, 2010; RASCIO & NAVARI-IZZO, 2011; CONINX *et al.*, 2017; GOMEZ *et al.*, 2018).

- COMPANT *et al.* (2010) e GOMEZ *et al.* (2018) trazem a necessidade de maior análise e sequenciamento de genomas dos micro/organismos envolvidos em processo de fitorremediação.
- Desenvolvimento de microrganismos frutos de engenharia genética visando a facilitação da biodisponibilidade de metais no solo (GLICK, 2010).
- Mais estudos devem ser realizados verificando o custo-benefício das técnicas fitorremediativas ou objetivando minimizar as limitações das técnicas envolvidas (TANGAHU *et al.*, 2011; ALI *et al.*, 2013; DATTA *et al.*, 2017;).
- Necessidade de estudos verificando os efeitos de diferentes tipos de catalisadores na eficiência de técnicas de fitorremediação (BOLAN *et al.*, 2014; CONINX *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2017; WEI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).
- A necessidade de estudos a longo prazo verificando a aptidão de diferentes espécies de plantas e simbioses já verificadas como fitorremediadoras em diferentes regiões (SHABANI & SAYADI, 2012; BOLAN *et al.*, 2014).
- Este estudo verificou a atenção reduzida à fitorremediação da água e ainda mais à fitorremediação do ar (evidenciado por ZHANG *et al.*, 2020), que apresentam resultados promissores para um meio de reduzir a poluição dos diferentes ambientes no planeta, incluindo meios urbanos, sendo assim dois campos que merecem mais atenção de futuros pesquisadores.

## 7 REFERÊNCIAS

Abraham, J.; Dowling, K.; Florentine, S. *Assessment of potentially toxic metal contamination in the soils of a legacy mine site in Central Victoria, Australia*. Chemosphere, v.192, p. 122-132, 2018.

Ahirwal, J. & Maiti, S.K. *Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (Shorea robusta) forest, India*. CATENA, V. 140, 2016, P. 155-163.

Albuquerque, C.C., Guedes, P.A.P, Drumond, M.M. *Fitorremediação De Áreas Contaminadas Por Rejeito De Mineração: Avaliação Das Concentrações De Ferro E Zinco* - Estudo De Caso De Bento Rodrigues, Mariana, Mg. Em: IX Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, XV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental e III Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2017.

Ali, H., Khan, E., Sajad, M. A. *Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications*. Chemosphere Vol. 91, n. 7, p.869 - 881, 2013.

Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J., Amezaga, I., Albizu, I., Garbisu, C. *Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic*. Reviews in Environmental Science and Bio/technology. N. 3, p.71–90, 2004.

Arunakumara, K.K.I.U., Walpola, B.C. & Yoon, MH. *Current status of heavy metal contamination in Asia's rice lands*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, n.12, p.355–377, 2013.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Public health assessment guidance manual*. Atlanta: ATSDR, 2005. Disponível em: [https://www.atsdr.cdc.gov/hac/phamanual/pdfs/phagm\\_final11-27-05.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/hac/phamanual/pdfs/phagm_final11-27-05.pdf). Acesso em: 15/03/2021.

Banerjee, R. *et al. Stabilization of iron ore mine spoil dump sites with vetiver system*. Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation, cap. 22, p.393-413, 2018.

Banerjee, R., Goswami, P., Lavania, S., *et al. Vetiver grass is a potential candidate for phytoremediation of iron ore mine spoil dumps*. Ecological Engineering, n. 132, p.120-136, 2019.

Benidire, L. *et al. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites*. Soil Science Annual, v. 71(4), p.395-407, 2020.

Bolan, N. *et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize?* Journal of Hazardous Materials, Vol. 266, p.141-166, 2014.

Bulgarelli, D. *et al. Revealing structure and assembly cues for Arabidopsis root-inhabiting bacterial microbiota*. Nature, Vol.488, p.91-95, 2012.

Chalot, M. *et al. Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood*. Environmental Science & Technology, vol.46, p.13361-13369, 2012.

Chaney, R.L. *et al.*, 1997. *Phytoremediation of soil metals*. Current Opinion in Biotechnology, Vol. 8, n. 3, p. 279-284, 1997.

Chaney, R.L. *Plant uptake of inorganic waste constituents*. In: Parr, J.F.E.A. (Ed.), Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, p. 50–76, 1983.

Chattopadhyay S., Chattopadhyay D. *Mining Industries and Their Sustainable Management*. In: Malhotra R. (eds) Fossil Energy, p.443-473. Springer, New York, NY, 2013.

Cherian, S., Oliveira, M.M. *Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities*. Environmental Science & Technology. Vol.39, n.24, p.9377–9390, 2005.

Clemens, S. *Developing tools for phytoremediation: towards a molecular understanding of plant metal tolerance and accumulation*. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, Vol. 14, No. 3, p.235—239, 2001.

Cluis, C. *Junk-greedy greens: phytoremediation as a new option for soil decontamination*. BioTeach Journal, Vol. 2, p. 61–67, 2004. Disponível em: <https://bioteach.ubc.ca/Journal/V02I01/phytoremediation.pdf>. Acesso em: 22/05/2021.

Compant, S., Clément, C., Sissitsch, A. *Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization*. Soil Biology & Biochemistry, Vol.42, p.669-678, 2010.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº 249, 30 dez. 2009. p. 81-84. Disponível em <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111046>. Acesso em:15/03/2021.

CONAMA. **Resolução CONAMA No 463**, de 29 de julho de 2014. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=705>. Acesso em: 22/05/2021.

Coninx, L., Martinova, V., Rineau, F. Chapter Four, Mycorrhiza-Assisted Phytoremediation. Elsevier, Advances in Botanical Research, Vol. 83, p.127-188, 2017.

Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W. *Phytoremediation of contaminated soils*. Trends in Biotechnology. Vol. 13, n. 9, p.393-37, 1995.

DalCorso G. *Heavy Metal Toxicity in Plants*. Disponível em: Furini A. (eds) Plants and Heavy Metals. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Dordrecht, p.1-25, 2012.

Datta, S.P. & Golui, D. & Sanyal, S.K. *Assessing Potential Threats of Soil Pollutant Elements in Relation to Food-chain Contamination with Suggested Remedial Measures*. 82nd Annual Convention of Indian Society of Soil Science, Indian Society of Soil Science, Kolkata Chapter, p.137-149, 2017.

Deckers, J. and Steinnes, E. *State of the art on soil-related geo-medical issues in the world*. Advances in Agronomy n.84, p. 1-35, 2004.

Edokpayi, J.N.; Odiyo, J.O.; Olasoji, S.O.; *Assessment of Heavy Metal Contamination of Dzindi River, In Limpopo Province, South Africa*. International Journal of Natural Sciences Research, vol.10, n.2, p.185-194, 2014

El Rasafi, T., Pereira, R., Pinto, G. *et al. Potential of Eucalyptus globulus for the phytoremediation of metals in a Moroccan iron mine soil - a case study*. Environmental Science and Pollution Research, 2020.

FAO & ITPS, Food and Agriculture Organization of the United Nations & Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. *Status of the Worlds's Soil Resources*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 20/05/2021.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018a. *Soil Degradation*. Disponível em: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>. Acesso em 02/03/2021.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018b. *Soil Pollution: a Hidden Reality*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i9183en/i9183en.pdf>. Acesso em: 20/05/2021.

FAO. *Guidelines for soil description*. Rome: Chief Publishing Management Service Information Division, 4 ed. 2006.

Fernández-Cadena, J. C.; Andrade, S.; Silva-Coello, C. L; & De la Iglesia, R. *Heavy metal concentration in mangrove surface sediments from the north-west coast of South America*. Marine Pollution Bulletin, n.82, vol.1-2, p. 221–226, 2014.

Fliebbach A, Martens R, Reber H. *Soil microbial biomass and activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge*, Soil Biology and Biochemistry, V.26 n.9 p.1201-1205, 1994.

G1. **Rio de Janeiro tem 141 áreas contaminadas por resíduos industriais**. G1, 2013. Disponível em: <http://g1.globo.com/bom-dia-brasil/noticia/2013/04/rio-de-janeiro-tem-141-areas-contaminadas-por-residuos-industriais.html>. Acesso em: 21/10/2021.

Gerhardt, K. E., Gerwing, P.D., Greenberg, B.M. *Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice*. Plant Science, Vol.256, p. 170-185, 2017.

WBGU (German Advisory Council on Global Change ou *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen*), *World in Transition: The Threat to Soils*, Economica Verlag GmbH, Bonn, Germany, 1994.

Gibbs, H.K., Salmon, J.M. *Mapping the World's degraded lands*. Elsevier: Applied Geography, V.57, p.12-21, 2015.

Glick, B. R. *Using Bacteria to facilitate phytoremediation*. Biotechnology Advances, vol.28, p.367-374, 2010.

Gomez, L. *et al. Phytoremediation with trees*. Elsevier, Advances in Botanical Research, Vol. 89, p. 281-321, 2019.

Gupta, U. C. and Gupta, S. C. *Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: Implications for management*. Communications in Soil Science and Plant Analysis n.29, p.1491-1522, 1998.

Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., Ahmed, I. *Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review*. Annals of Microbiology, Vol.60, p.579-598, 2010.

Hernández-Valencia, I. H., Navas, G., Infante, C. *Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus**. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 33(3), p.495-503, 2017.

Jaffre, T.; Brooks, R. R.; Lee, J.; Reeves, R. D. (1976). *Sebertia acuminata: A Hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia*. *Science*, 193(4253), 579–580. doi:10.1126/science.193.4253.579.

Jing, L. **Soil Pollution poisons more than farmland**. China Daily, 2011. Disponível em: [http://www.chinadaily.com.cn/2011-03/10/content\\_12146168\\_2.htm](http://www.chinadaily.com.cn/2011-03/10/content_12146168_2.htm). Acesso em:21/10/2021.

Kadukova, J. & Kavulicova, J. *Phytoremediation and Stress*. Botanical Research and Practices. Nova Science Publishers, Inc. 2010.

Karami, A., Shamsuddin, Z.H. *Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods*. African Journal of Biotechnology Vol. 9, n.25, p. 3689-3698, 2010.

Kemp, D.D. 1998. *The environment dictionary*. London; New York, Routledge.

Kien, C.N., Noi, N.V., Son, L.T., *et al.* *Heavy metal contamination of agricultural soils around a chromite mine in Vietnam*. Soil Science and Plant Nutrition v.56, p. 344–356, 2010.

Kłos, A., Czora, M., Rajfur, M., Waclawek, M. *Mechanisms for translocation of heavy metals from soil to epigeal mosses*. Water, Air, Soil & Pollution. Vol. 223, p.1829–1836, 2012.

Kumar, M., Prasad, R., Varma, A. *Role of PGPR in Soil Fertility and Plant Health*. Em Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants, cap.12, p.247-260. Springer, Soil Biology, vol.42, 2015a.

Kumar, S., Maiti, S.K., Chaudhuri, S. *Soil development in 2–21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: A case study from Sonapur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India*. Ecological Engineering, V. 84, 2015b, p. 311-324.

Landeros-Márquez, O. *et al.* **Uso Potencial del Huizache (*Acacia franesiana* L.Will) em la Fitorremediación de suelos contaminados con plomo**. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol. XVII, Ed. Especial, p.11-20, 2011.

Lazo, P., Steinnes, E., Qarri, F., Allajbeu, S., Kane, S., Stafilov, T., Forntasyeva, M. V., Harmens, H. *Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: A hotspot of heavy metal contamination in Europe*. Chemosphere, Vol. 190, p. 337–349, 2018.

LeDuc, D.L., Terry, N., 2005. *Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water*. Journal of Industry Microbiology Biotechnology. Vol.32, p.514–520.

Lepp, N.W. *Effect of heavy metal pollution on plants*, V.2. Applied science publishers London and New Jersey, 1981.

Liu Z., Chen B., Wang Li-ao, Urbanovich O., Nagorskaya L., Li X., Tang L. *A review on phytoremediation of mercury contaminated soils*. Journal of Hazardous Materials, Vol. 400 2020.

Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. *Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability*. *Science of The Total Environment*, n. 633, p. 206–219. 2018.

Lottermoser, B.G. **Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes**. *Elements*, v.7(6), p.405-410, 2011.

Luiz, M.B.; Hirata, R.; Terada, R.; Saraiva, F.; Tasse, N. **Fitorremediação De Aquíferos Contaminados Por Nitrato**. XIX Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 2016. Disponível em: <https://studylibpt.com/doc/6196044/--associação-brasileira-de-águas-subterrâneas>. Acesso em: 10/03/2021.

Lundberg, D. *et al.* **Defining the core Arabidopsis thaliana root microbiome**. *Nature*, Vol.488(7409), p.86–90, 2012.

Milčić, N., Blažević, Z.F., Domanovac, M.V. **Fitoremedijacija – pregled stanja i perspektiva. Kemija u industriji : časopis kemičara i tehnologa**. Hrvatske, Vol.68 (9-10), p.417-426, 2019.

Moraes, S.L., Teixeira, C.E., Maximiano, A.M.S. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o Gerenciamento de áreas contaminadas**, 1ª edição revisada, São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: BNDES, 2014 - (Publicação IPT; 4374)

Oliver, M. A. **Soil and human health: a review**. *European Journal of Soil Science* n.48, p.573-592, 1997.

Pizarro, R., Flores, J. P., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., León, L. **Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities**. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol.22(1), p.29–43, 2015.

Praveen, A., Pandey, V.C. **Pteridophytes in phytoremediation**. *Environmental Geochemistry and Health*, Vol. 42, p.2399-2411, 2020.

Procópio, S. de O. *et al.* Efeito da densidade populacional de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram. *Semina: Ciências Agrárias*, vol. 30, n.2, p.295-304, 2009.

Rascio, N., Navari-Izzo, F. **Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?** *Plant Science*, vol.180, p.169-181, 2011.

Rodrigues, R.E. de A.V., Souza, V.L.B., De Lima, V.L., Hazin, C.A. **Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão**, 2014. Disponível em: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/015/46015574.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/015/46015574.pdf). Acesso em: 22/05/2021.

Rowley, J. & Slack, F. (2004), **Conducting a literature review**, *Management Research News*, Vol. 27 No. 6, pp. 31-39. <https://doi.org/10.1108/01409170410784185>

Rybicka, E.H. **Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland**. *Applied Geochemistry*, Vol. 11, p.3-9, 1996.

Saier Jr., M.H. & Trevors, J.T. **Phytoremediation**. Springer. Water, Air & Soil Pollution, vol. 205, S61-S63, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11270-008-9673-4.pdf>

Salt, D.; Blaylock, M.; Kumar, N. *et al.* **Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants**. *Nature Biotechnology* n.13, p.468–474, 1995.

Santos, E. A., Mariano, T.L.S., Barja, P.R., Aquino-Silva, M.R. **Aplicação Do Processo De Fitorremediação Utilizando Vetiver (*Vetiveria Zizanioides (L.) Nash.*) Na Descontaminação De Solos Tropicais Contaminados Por Chorume**. *Revista Univap*, Vol. 26, n. 51, 2020.

Shabani, N., Sayadi, M.H. **Evaluation of heavy metals accumulation by two emergent macrophytes from the polluted soil: an experimental study**. *Environmentalist* vol.32, p.91–98, 2012.

Shaw, A.J. **Heavy-metal tolerance in plants: Evolutionary Aspects**. Florida, CRC Press, 1989.

Silva, F.B.T.; Faria, T.L.; Cabanas, A.; Simões, G.S.; **Árvores Freatófitas: Processo De Fitorremediação aos Resíduos Industriais**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba, 2016. Disponível em: [http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2016/anais/arquivos/RE\\_0218\\_0682\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/RE_0218_0682_01.pdf). Acesso em 10/03/2021.

Sinha, R. K., Herat, S., e Tandon, P. K. **14 phytoremediation: role of plants in contaminated site management**, em: *Book of Environmental Bioremediation Technologies*. Springer: Berlin, Germany, p. 315–330, 2004.

Su, C., Jiang, L., Zhang, W. **A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques**. *Environmental Skeptics and Critics*, Vol. 3(2), p. 24-38, 2014.

Tangahu, B.V. *et al.* **A review on Heavy Metals (As, Pb and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation**. *International Journal of Chemical Engineering*, Vol.2011, 2011. Disponível em: [https://www.academia.edu/971146/A\\_Review\\_on\\_Heavy\\_Metals\\_As\\_Pb\\_and\\_Hg\\_Uptake\\_by\\_Plants\\_through\\_Phytoremediation](https://www.academia.edu/971146/A_Review_on_Heavy_Metals_As_Pb_and_Hg_Uptake_by_Plants_through_Phytoremediation).

Tarazona, J.V. 2014. Pollution, Soil. **Encyclopedia of Toxicology**, Vol. 3, p. 1019–1023. Elsevier. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123864543005315>. Acesso em: 21/05/2021.

TAVARES, S. R. de L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos**. Joinville: Clube de Autores, 2013. cap. 2, p. 61-90.

Tavares, S.R.L., Oliveira, S.A., Salgado, C.M. **Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados**. *HOLOS*, ano 29, V.5, 2013.

Tong, Y.P., Kneer, R., Zhu, Y.G. *Vacuolar compartmentalization: a second-generation approach to engineering plants for phytoremediation*. Trends in Plant Science. Vol.9, n.1, p.7–9, 2004.

UNCED - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992). **Agenda 21**. Disponível em: <https://www.ecologiaintegral.org.br/Agenda21.pdf>. Acesso em 16/02/2021.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2008. *Ngwenya Mines*. Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/5421/>. Acesso em: 24/02/2021.

Wang, L., Ji, B., Hu, Y., *et al.* *A review on in situ phytoremediation of mine tailings*. Chemosphere, Vol. 184, p. 594-600, 2017.

Wani, W., Masoodi, K.Z., Zaid, A. *et al.* *Engineering plants for heavy metal stress tolerance*. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali V.29, p.709–723, 2018.

Wei, Z., Le, Q.V., Peng, W., *et al.* *A review on phytoremediation of contaminants in air water and soil*. Journal of Hazardous Materials, n.403, 2021.

Yan, An *et al.* *Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land*, 2020. Frontiers in Plant Science, Vol.11, n.356.

Zand, A.D., Tabrizi, A.M., Heir, A.V. *Application of titanium dioxide nanoparticles to promote phytoremediation of Cd-polluted soil: contribution of PGPR inoculation*. Bioremediation Journal, Vol.24, NoS. 2-3, p.171-189, 2020.

Zhang, B., Cao, D., Zhu, S. *Use of Plants to Clean Polluted Air: A Potentially Effective and Low-Cost Phytoremediation Technology*. BioResources, vol.15(3), p.4650-4654, 2020.

## 8 ANEXOS

Tabela 16 - número de títulos/mês/ano para *phytoextraction* – *Publons* – 1

phytoextraction	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	soma total
jan	6	5	4	3	5	10	3	9	7	7	4	63	
fev	2	1	4	3	3	3	4	4	3	6	4	37	
mar	0	5	2	2	3	2	3	4	3	7	7	38	
abr	3	1	0	4	2	6	2	3	3	5	5	34	
mai	5	1	1	3	3	3	4	6	4	4	7	41	
jun	3	1	3	0	3	0	3	9	6	4	4	36	
jul	6	2	0	4	1	1	3	1	5	8	6	37	
ago	1	1	5	6	4	3	2	5	5	4	8	44	
set	2	2	2	3	1	0	3	2	2	3	4	24	
out	0	3	3	4	2	0	3	2	2	4	10	33	
nov	2	5	4	2	2	2	2	3	5	5	8	40	
dez	2	0	1	6	3	1	2	4	1	7	11	38	
sem mes	13	16	18	19	20	33	18	24	20	21	7	209	
total	45	43	47	59	52	64	52	76	66	85	85		674

Elaborado pelo autor.

Tabela 17 - número de títulos/mês/ano para *phytoremediation* – *Publons* – 2

phytoremediation	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	total	soma total
jan									21	22	28	71	
fev									12	18	37	67	
mar									19	21	35	75	
abr									21	19	35	75	
mai									17	18	36	71	
jun									22	34	41	97	
jul									14	23	24	61	
ago									16	20	34	70	
set									17	19	27	63	
out									16	20	32	68	
nov									20	38	32	90	
dez								14	16	31	40	101	
sem mes									101	137	58	296	
total	0	0	0	0	0	0	0	14	312	420	459		1219

Elaborado pelo autor.

Em branco - não foi possível contabilizar o número de publicações devido a limitação da plataforma utilizada.