

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

MANOEL FÁBIO DA ROCHA

**Teores de Pb no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum*
coletada em áreas de depósito de rejeito na Bacia Carbonífera
Catarinense**

LAGES
2023

MANOEL FÁBIO DA ROCHA

**Teores de Pb no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum* coletada
em áreas de depósito de rejeito na Bacia Carbonífera Catarinense**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, do Centro
de Ciências
Agroveterinárias - CAV, da
Universidade do Estado de
Santa Catarina - UDESC, como
requisito parcial para obtenção
do grau de Mestre em Ciências
Ambientais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mari
Lucia Campos.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a.
Martha Mayumi Higarashi

LAGES

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

da Rocha, Manoel Fábio
Teores de Pb no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum* coletada em áreas de depósito de rejeito na Bacia Carbonífera Catarinense / Manoel Fábio da Rocha. -- 2023.
67 p.

Orientadora: Mari Lucia Campos
Coorientadora: Martha Mayumi Higarashi
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2023.

1. Elemento-traço. 2. Mineração. 3. Solos degradados. I. Campos, Mari Lucia . II. Mayumi Higarashi, Martha . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. IV. Título.

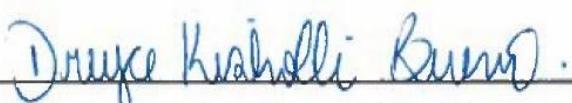
**Teores de Pb no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum* coletada
em áreas de depósito de rejeito na Bacia Carbonífera Catarinense**

BANCA EXAMINADORA



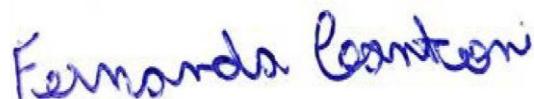
Orientadora/Presidente: Prof^a. Dr^a. Mari Lucia Campos

UDESC – CAV



Membro externo: Dr^a. Dreyce Kisholli Bueno

Colégio Sta Rosa de Lima, Lages-SC



Membro externo: Dr^a. Fernanda Cantoni

Usina Termelétrica Pampa Sul, RS

“Vem vamos embora, que esperar não é saber,
Quem sabe faz a hora, não espera acontecer”
Pra não dizer que não falei das flores

Geraldo Vandré

AGRADECIMENTOS

Ao SENHOR, pela força dada a mim para aguentar tudo que ocorreu em minha vida e continuar focado em minha meta;

A Dirce Maria da Rocha, minha mãe, pelo apoio incondicional e por compreender que as vezes precisamos ir para longe, para crescer profissionalmente;

A Zuleide Freitas, minha avó de coração, *in memoriam*, MELHOR SER HUMANO QUE CONHECI, por ter me criado como um neto e educado na base do diálogo, o que me tornou uma pessoa melhor e principalmente racional;

A Mari Lucia Campos e Martha Mayumi Higarashi, minhas orientadoras, pelo acompanhamento e apoio ao longo do mestrado e da presente pesquisa;

Ao professor David José Miquelluti, pela ajuda nas análises estatísticas;

A Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, pela oportunidade ímpar em me proporcionar a formação em Mestre em Ciências Ambientais;

Ao Programa de Bolsas de Monitoria de Pós-Graduação, PROMOP, por tornar viável minha permanência no mestrado;

A todos, meu muito obrigado.

Veni Vidi Vici

DA ROCHA, Manoel Fábio. **Teores de Pb no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum* coletada em áreas de depósito de rejeito na Bacia Carbonífera Catarinense.** 67 Páginas. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2023.

RESUMO

As ações antrópicas têm elevado os teores de elementos-traço pelo planeta, ocasionando contaminações em corpos d'água e solos, a exemplo do que ocorre na Bacia Carbonífera Catarinense (BCC) e os passivos ambientais ocasionados pela atividade de mineração do carvão. No passado a disposição indevida de rejeitos e estéreis e a presença de pirita (FeS_2) a céu aberto além de favorecer a formação de drenagem ácida de mina (DAM), degradou e modificou a flora e fauna do local. O presente estudo teve por objetivo realizar uma revisão bibliométrica sobre mineração de carvão e a utilização de samambaias como fitorremediadoras e avaliar o potencial fitorremediador da samambaia *Pteridium arachnoideum* em área de depósito de carvão em SC. A metodologia foi dividida em duas etapas: na primeira foi realizada uma análise bibliométrica em banco de dados Scopus e Web of Science (WOS) com termos específicos, como “fern”, “phytoremediation” e “mining”, analisando os artigos publicados entre os anos de 2002 a 2022. Na segunda realizou-se avaliação do acúmulo de Pb no tecido da samambaia *P. arachnoideum* coletada em áreas de mineração de carvão da BCC. Criciúma, Forquilhinha, Lauro Müller, Siderópolis e Urussanga, foram os municípios para o desenvolvimento da pesquisa sobre caracterização dos teores de Pb presente nos rejeitos e estéreis dos depósitos da BCC, por apresentarem maiores problemas com passivos ambientais. Os teores de Pb encontram-se acima do valor de prevenção predito, para o solo, tanto para a resolução CONAMA nº 420/2009, em três depósitos avaliados (A7, A8 e A9) que é de 72 $mg\cdot kg^{-1}$, quanto para a Portaria do IMA nº 45/2021, de 16,08 $mg\cdot kg^{-1}$, onde apenas a área A12 não apresentou valor superior ao estabelecido. Os estéreis e rejeitos da mineração são quimicamente pobres em macro e micronutrientes, apresentando teores anômalos de elementos-traço. Mesmo com altos teores de Pb no solo, a *P. arachnoideum*, consegue se desenvolver neste ambiente inóspito, demonstrando que a espécie pode apresentar potencial para fitoestabilização do elemento-traço.

Palavras-chave: Elemento – traço; mineração; solos degradados.

DA ROCHA, Manoel Fábio. **Pb levels in the tissue of the fern *Pteridium arachnoideum* collected in tailings deposit areas in the Santa Catarina Carboniferous Basin.** 67 Pages. Dissertation (Master in Environmental Sciences) - Postgraduate Program in Environmental Sciences. State University of Santa Catarina, Lages, 2023.

ABSTRACT

The anthropic actions have increased the levels of trace elements around the planet, causing contamination in water bodies and soils, such as what occurs in the Santa Catarina Coal Basin (BCC) and the environmental liabilities caused by coal mining activity. In the past, the improper disposal of tailings and sterile and the presence of pyrite (FeS_2) in the open, in addition to favoring the formation of acid mine drainage (DAM), degraded and modified the flora and fauna of the site. The present study aimed to perform a bibliometric review on coal mining and the use of ferns as phytoremediators and to evaluate the phytoremediating potential of the fern *Pteridium arachnoideum* in a coal deposit area in SC. The methodology was divided into two stages: in the first, a bibliometric analysis was performed in the Scopus and Web of Science (WOS) databases with specific terms, such as "fern", "phytoremediation" and "mining", analyzing the articles published between the years 2002 to 2022. In the second, the accumulation of Pb in the tissue of the fern *P. arachnoideum* collected in coal mining areas of the BCC was evaluated. Criciúma, Forquilhinha, Lauro Müller, Siderópolis and Urussanga, were the municipalities for the development of research on the characterization of the levels of Pb present in the tailings and sterile of the BCC deposits, because they present greater problems with environmental liabilities. The Pb contents are above the predicted prevention value for the soil, both for CONAMA resolution n^o 420/2009, in three evaluated deposits (A7, A8 and A9) which is $72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and for IMA Ordinance n^o 45/2021, of $16.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, where only area A12 did not present a value higher than the established one. The sterile and tailings from mining are chemically poor in macro and micronutrients, presenting anomalous contents of trace elements. Even with high levels of Pb in the soil, *P. arachnoideum* can develop in this inhospitable environment, demonstrating that the species may have potential for phytostabilization of the trace element.

Keywords: Element – trace; mining; degraded soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação botânica da <i>Pteridium arachnoideum</i>	30
Figura 2: Em sentido horário: Plantas jovens e adultas de <i>P. arachnoideum</i> ; Soros localizados na parte abaxial das frondes, contendo esporos; Serrapilheira, rizomas e Brotos em estádio juvenil com limbos enrolados	32
Figura 3: 51 artigos, de 2002 a 2022, encontrados para os termos “fern”, “phytoremediation” e “mining”, na base de dados Scopus.	38
Figura 4: Colonização por micorrizas para as dez áreas da pesquisa.	50
Figura 5: Fatores de translocação e de bioacumulação em <i>P. arachnoideum</i> , presente nas dez áreas da pesquisa	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas legislações brasileiras sobre a temática carvão mineral....	21
Tabela 2: Alguns exemplos de plantas que podem ser utilizadas para remediação de solos contaminados com Pb	29
Tabela 3: Descrição das áreas dos cinco municípios catarinenses.....	40
Tabela 4: Caracterização do rejeito piritoso da mineração de carvão nos 9 depósitos e do solo na área sem interferência da mineração, na Bacia Carbonífera Catarinense. Média dos valores (*).	41
Tabela 5: Valores certificados e recuperados para Pb da amostra referência NIST SRM 2709 A (San Joaquin Soil) e Limite de detecção e quantificação operacionais, LDO respectivamente.....	42
Tabela 6: Artigos encontrados na base de dados WOS para os termos “fern”, “phytoremediatio” e “mining”, de 2002 a 2022.....	43
Tabela 7: Quantidade de publicações, de artigos, por países, entre os anos de 2002 a 2022, pela base de dados da Scopus	44
Tabela 8: Número de publicações dos artigos por área temática que compõe o portfólio bibliográfico.	45
Tabela 9: Financiadores das pesquisas.....	46
Tabela 10: Periódicos e respectivas publicações para o período de 2002 a 2022. NDP= número de publicações.....	47
Tabela 11: Correlação linear positiva entre teores de Pb no rejeito piritoso e solo (RPS), sistema radicular e parte aérea de <i>Pteridium arachnoideum</i>	49
Tabela 12: Teores médios de Pb no RPS, no sistema radicular e parte aérea da <i>P. arachnoideum</i> coletada em 9 áreas de mineração de carvão e uma área testemunha (AT2). *Letras minúsculas correspondem a comparação entre áreas para teste Tukey e 5% de significância.....	49
Tabela 13: Correlação linear entre teores de Pb no rejeito piritoso e no solo(RPS) versus fator de translocação e RPS versus fator de bioacumulação para <i>P. arachnoideum</i>	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA: Análise de variação

BCC: Bacia Carbonífera Catarinense

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC: Capacidade de troca de cátions

DAM: Drenagem ácida de mina

DER: Departamento de Estradas de Rodagem

DNA: Ácido Desoxirribonucleico

DNPM: Departamento Nacional da Produção Mineral

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

ES: Espírito Santo

ET's: Elementos-traço

FB: Fator de bioacumulação

FT: Fator de translocação

FMA's: Fungos micorrízicos arbusculares

GEE: Gases do efeito estufa

IMA: Instituto do Meio Ambiente

MPF: Ministério Público Federal

MO: Matéria orgânica

MT: Mato Grosso

m²: Metros quadrados

PF: Pessoa física

pH: Potencial hidrogeniônico

PJ: Pessoa jurídica

PR: Paraná

PRAD: Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

PRONAR: Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar

RIMA: Relatório do Impacto Ambiental

RO: Rondônia

RPS: rejeito piritoso e no solo

RS: Rio Grande do Sul

SATC: Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão

SC: Santa Catarina

SP: São Paulo

SPTZ's: Espermatozoides

TEJ: Programa de Transição Energética Justa

VRQ: Valores de Referência de Qualidade

WOS: Web of Science

LISTA DE ELEMENTOS E SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS

Al: Alumínio

As: Arsênio

Au: Ouro

Ba: Bário

CaCO_3 : Carbonato de cálcio

Cd: Cádmio

CH_4 : Metano

Co: Cobalto

CO_2 : Dióxido de carbono (gás carbônico)

Cr: Cromo

Cu: Cobre

Fe: Ferro

FeS_2 : Dissulfeto de ferro (pirita)

Hg: Mercúrio

H_2O_2 : Peróxido de Hidrogênio

Mn: Manganês

Ni: Níquel

Pb: Chumbo

$\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$: Fosfato de chumbo

S: Enxofre

Sb: Antimônio

Se: Selênio

SO_2 : Dióxido de enxofre

Zn: Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Mineração de carvão: Processo de produção	19
2.2. Mineração de carvão: Legislações brasileiras sobre carvão mineral	21
2.3. Mineração de carvão: Presença de elementos-traço e contaminação dos solos e corpos d'água	24
2.4. Pb e seus efeitos na saúde humana	26
2.5. Potencial fitorremediador das samambaias.....	28
2.6. <i>Pteridium arachnoideum</i>	30
2.7. Mecanismos fisiológicos das samambaias para tolerar ET's	33
3. OBJETIVOS	35
3.1. OBJETIVOS GERAIS.....	35
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	35
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1. 1 ^a Parte: Revisão bibliométrica	37
4.2. 2 ^a Parte: Avaliação do acúmulo de Pb no tecido da samambaia <i>Pteridium arachnoideum</i>	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. Revisão bibliométrica.....	43
5.2. Países e áreas temáticas	44
5.3. Periódicos.....	47
5.4. Avaliação do acúmulo de Pb no tecido da samambaia <i>P. arachnoideum</i> coletada em áreas de mineração de carvão.....	49
6. CONCLUSÃO.....	53
7. CONSIDERAÇÕES GERAIS	54
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

ANEXO 1: Links para acesso as legislações	66
ANEXO 2: Lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas, obtidos da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 420, de 28/12/2009	67

1. INTRODUÇÃO

As atividades antropogênicas, a exemplo da mineração de carvão, podem ocasionar poluição por elementos-traço (ET's) nos solos e em mananciais de água, como rios e lagos (DANIEL, 2018). Conforme ZHU et al. (2018) a mineração de carvão é uma das atividades mais altamente poluentes ao meio ambiente. No Brasil, a ocorrência de carvão mineral abrange os Estados do Sul (PR, SC e RS) e SP (SILVA e FERREIRA, 2015).

Em Santa Catarina há municípios que se destacam como importantes centros de mineração, são eles: Urussanga, Treviso, Siderópolis, Morro da Fumaça, Maracajá, Lauro Müller, Içara, Forquilhinha, Criciúma e SC é o maior Estado produtor de carvão mineral, apresentando no quadriênio de 2017 – 2020 resultados, em toneladas, iguais a 3.969,4; 4.523,9; 4.387,5 e 4.723,4 respectivamente (Boletim SGM, 2021). A Bacia Carbonífera Catarinense está inserida nas bacias hidrográficas dos rios Urussanga, Araranguá e Tubarão, com aproximadamente 5.098 hectares impactados pela mineração do carvão (SGB, 2022).

O dissulfeto de ferro (FeS_2) conhecido como pirita, encontrada nos rejeitos e estérios da mineração de carvão, que pode, em contato com água ou oxigênio, vir a oxidar e formar a Drenagem Ácida de Mina (DAM), solução aquosa, é um dos principais passivos ambientais da atividade (CÉSAR et al., 2017).

Rejeitos depositados de maneira inadequada apresentam elevados teores de sulfetos, na forma de FeS_2 , que ocasionam contaminações nas águas superficiais e subterrâneas, agravando os problemas ao meio (FERREIRA, 2021).

A poluição por ET'S em tais áreas, além de ser frequente, podem ocasionar danos à saúde humana e a biota do local (BUCH et al., 2020). Conforme OLIVEIRA (2019) os rejeitos advindos da mineração de carvão, quando submetidos a ação ambiental, ocasionam a acidificação da drenagem e contaminam solos e mananciais de água, com ET's, como o Pb.

O comportamento dos metais nos solos dependerá de diversos fatores como potencial hidrogeniônico (pH), densidade de partículas, oxihidróxidos de Fe e Al, Capacidade de Troca de Cátions (CTC), matéria orgânica (MO), entre outros (MARRUGO NEGRETE et al., 2017), sendo que reduções do pH podem ocasionar mudanças no oxigênio dissolvido, nas concentrações de Fe, Mn e Al e de ET's (CÉSAR et al., 2017). ET's liberados no solo tem potencial de serem absorvidos pelo sistema radicular, alterando o metabolismo das plantas, podendo ocasionar sérios riscos à saúde humana (GALVAN et al., 2022).

A mineração pode ser subterrânea ou a céu aberto. Na subterrânea são feitas galerias paralelas coligadas com laterais, com abertura padronizada em 5m de largura e 1,76m de altura ($8,80m^2$) conforme RIBEIRO e FERREIRA (2007).

A subterrânea é uma fonte significativa de emissões fugitivas de GEE, como CO₂ e CH₄, devido ao uso de máquinas que utilizam-se, na maioria dos casos, de combustível fóssil (SINGH et al., 2022). É estimado algo em torno de 30 a 35% do total de emissão de CO₂ na mineração do carvão (ANEEL, 2020).

A mineração subterrânea encontra-se em declínio, não somente por apresentar menor produtividade econômica quando comparada a de céu aberto, mas também pelo aumento dos cuidados com a segurança e oportunidades de extração de baixo custo de depósitos rasos (TRIPATHY e ALA, 2018).

Na mineração a céu aberto os passivos ambientais são gerados desde a construção para a exploração do carvão, ocasionando mudanças nas paisagens, como destruição da cobertura vegetal, remoção do solo superficial, remodelagem topográfica, destruição da camada fértil, entre outros (WANG et al., 2022). A mineração nesta modalidade é possível quando o carvão está próximo a superfície (WANG et al., 2020).

Áreas urbanas e rurais próximas as regiões carboníferas, são descaracterizadas quanto a sua população vegetal nativa, levando a inexistência de vegetação (ZHU et al., 2022). Conforme KAWAKAMI (1992) algumas espécies de pteridófitas, como samambaias dos gêneros *Pteridium*, *Adiantum*, *Blechnum*, entre outros, são tolerantes a ambientes inóspitos, como é o caso dos depósitos de rejeitos de carvão e por apresentarem tal rusticidade e serem nativas da região, podem ser utilizadas em um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), tentando reestabelecer funções ecológicas existentes antes da deterioração ocasionada pela mineração.

A fitorremediação é uma tecnologia que utiliza plantas e seus microrganismos associados para remediar problemas ocasionados no solo e água, podendo ser utilizada nos tratamentos de extensas áreas contaminadas com poluentes orgânicos e inorgânicos, como ET's, além de ser uma técnica com custo relativamente baixo quando comparada a outras técnicas de remediação (ANDRADE et al., 2007).

A associação de plantas e microrganismos, como Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA's) podem ter efeito significativo na absorção de ET's (BIASI et al., 2013). Conforme BIASI et al. (2013) o resultado da colonização por FMA's, em reduzir teores de ET's do solo, depende da combinação planta-FMA's-ET's, sendo influenciada pelas condições do solo.

Em áreas degradadas pela mineração de carvão é possível a utilização de plantas com potencial fitorremediador objetivando a recuperação de tais áreas (ZHU et al., 2022). O presente estudo teve por objetivo realizar uma revisão bibliométrica sobre mineração de carvão e a utilização de samambaias como fitorremediadoras e avaliar o potencial fitorremediador da samambaia *Pteridium arachnoiudeum* encontrada em áreas de mineração em SC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mineração de carvão: Processo de produção

Os elementos presentes na composição do carvão mineral são oxigênio, enxofre, hidrogênio, cinzas e, em grande parte, carbono, por ser uma rocha sedimentar formada por componentes orgânicos fossilizados ao longo de milhões de anos (COSMO et al., 2020). Há também a presença de calcita (CaCO_3), caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), entre outros (WANG, 2022).

O carvão pode ser classificado, em quatro tipos, conforme sua qualidade, a saber: antracito (93 a 98%); betuminoso ou hulha (80 a 93%); linhito (65 a 80%) e turfa (55 a 65% de C) sendo que o grau de carbonificação é denominado de rank e quanto mais alto for este, melhor será a qualidade do carvão (SCHUMANN, 1985).

O poder calorífico do carvão é uma característica que deve ser considerada (KIJO-KLECZKOWSKA, 2022). Conforme GAGARIN (2020) o carvão apresenta um elevado teor de carbono e poder calorífico. Este poder, que é considerada uma propriedade fundamental, nos linhitos e turfas é inferior a 4.000 Kcal e nos demais tipos de carvão encontra-se entre 7.000 e 8.650 Kcal, sendo que o carvão tipo turfa permite evidentemente a identificação dos remanescentes vegetais.

Características como temperatura, pressão e intensidade que a matéria vegetal, foi submetida e o tempo deste processo influenciarão no rank. Além do rank na classificação dos tipos de carvão, há o grade, que é a relação entre as matérias orgânicas e compostos inorgânicos presentes nas camadas do carvão mineral (CETEM, 2014). O carvão apresenta elevado teor de carbono e poder calorífico (KIJO-KLECZKOSKA, 2022).

O carvão tipo turfa é depositado a céu aberto, com intuito de diminuir umidade (DAI et al., 2020), sendo que a turfa agrícola pode ser utilizada como combustível em termoelétricas e fornalhas, por exemplo, sendo que a mesma apresenta relevante utilização na reconstituição de solos agrícolas (SGB, 2022).

Os rejeitos gerados no processo de mineração são os ESTÉREIS, compostos por materiais de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes do material e sem valor econômico e os REJEITOS, compostos por resíduos sólidos das operações de beneficiamento, com alto grau de toxicidade e de partículas dissolvidas ou em suspensão, reagentes e ET's (ANDREOLA, 2015).

A incidência de impurezas e o poder calorífico predizem a subdivisão nas categorias de baixa qualidade, como o linhito e sub-betuminoso e os de alta qualidade, como antracito e betuminoso (MA et al., 2022).

Distintos carvões exibem diferentes propriedades de maneira que seu valor para aplicações industriais varia. Macerais são constituintes de materiais orgânicos similares aos minerais de rochas ígneas presentes no carvão mineral (KUANG et al., 2022). A maior parte do carvão de SC, do tipo betuminoso, sendo que este tipo de carvão pode ser compreendido como lustroso, de coloração cinza escura ou preta, de elevada qualidade, também denominados como graxas ou hulhas (SGB, 2022).

A maior parte dos países do mundo dependem do carvão para consumo de energia, entretanto o Brasil depende muito menos deste tipo de energia, pois as hidrelétricas, no ano de 2020, supriram cerca de 66% da demanda por eletricidade (IEA, 2021). Em SC o principal uso do carvão mineral é para geração de energia elétrica e as termoelétricas geram uma mão de obra em torno de 80%, a nível nacional, em relação aos empregos relacionados ao setor carbonífero, de 2012 a 2022, propiciando desenvolvimento socioeconômico na região da BCC (ALBERT, 2022).

2.2. Mineração de carvão: Legislações brasileiras sobre carvão mineral

Diversas são as legislações brasileiras que tratam sobre carvão mineral. A tabela 1 mostra as principais legislações a nível nacional e estadual sobre esta temática.

Tabela 1: Algumas legislações brasileiras sobre a temática carvão mineral.

Legislação	Descrição
Lei nº 1.886 (11/06/1953)	Aprovou o Plano do Carvão Nacional. objetivando, entre outras medidas, o uso do carvão onde se achavam as jazidas, juntamente com as regiões de densidade elevada, de uso de energia elétrica.
Lei nº 3.353 (20/12/1957)	Prorrogou a vigência da Lei nº 1.886, dispondo sobre sua execução e tratando sobre outras providências.
Lei nº 1.886 (24/12/1960)	Reconheceu o plano de coordenação das atividades relacionadas com o carvão mineral, englobando todo o ciclo econômico do produto, desde as atividades de pesquisa, lavra, beneficiamento, transportes, até a distribuição e consumo de combustível.
Lei nº 2.858 (02/10/1961)	Proibiu o emprego de carvão ou seus derivados e subprodutos no leito de estradas catarinenses, a exemplo da pirita ou quaisquer outros subprodutos advindos da lavra ou do beneficiamento.
DL nº 227 (28/02/1976)	Deu uma nova redação ao DL no 1.985 (29/01/1940) conhecido por Código de Minas, atribuindo competência à União para administrar recursos minerais, além das indústrias de produção mineral.
Lei nº 6.567 (24/09/1978)	Trata sobre o regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais que especifica, além de dar outras providências.

Fonte: O Autor (2023).

Lei nº 13.972 (26/01/2007) Dispõe sobre dispensa de EIA e de RIMA, para atividade de pequeno porte de extração de carvão mineral a céu aberto, em áreas remanescentes mineradas em subsolo e a céu aberto, com área total de até cinco hectares.

O Decreto Federal nº 97.632, artigo 1º, prediz que os empreendimentos destinados à exploração de recursos minerais, como exemplo o carvão, devem apresentar Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório do Impacto Ambiental (RIMA), submeter à aprovação do órgão ambiental competente, um PRAD.

A Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 08 de 06 de dezembro de 1990, dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustões externas de fontes fixas de poluição e em relação ao carvão mineral prediz limites de: 1.500 gramas por milhão de quilocalorias de partículas totais; 5.000 gramas por milhão de quilocalorias de SO₂.

Estes valores, de partículas totais e SO₂, seguem o que está estabelecido no artigo segundo da referida resolução, expressos em peso de poluentes pelo poder calorífico superior do combustível e da densidade colorimétrica conforme classificação de usos pretendidos delineado pelo Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR).

A Lei municipal nº 1.804, reafirma no parágrafo único, no artigo 72º, que independente de autorização federal ou estadual, a PF ou PJ interessadas na extração e beneficiamento de carvão mineral, não será concedida licença municipal a tais atividades.

Em 1993 o MPF propôs uma Ação Civil Pública (ACP) em desfavor das empresas carboníferas, seus diretores e sócios majoritários, o Estado de SC e a União Federal. Tal Ação ficou conhecida como ACP do Carvão, demandando das empresas carboníferas e à União, a recuperação dos passivos ambientais ocasionados pela exploração de carvão mineral na região Sul catarinense (ACP Carvão, 2023).

Em 05/01/2000, a sentença foi proferida pela Justiça Federal, condenando os réus, solidariamente, a recuperar a BCC. A sentença exigia inicialmente a apresentação, em um prazo de seis meses, de um PRAD que recuperasse as áreas de depósitos de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto e minas abandonadas, assim como o desassoreamento, descontaminação e retificação dos cursos d'água, além de outras obras (ACP Carvão, 2023).

A sentença foi retomada mais tarde e o prazo para a recuperação dos recursos hídricos foi ampliado para dez anos, permanecendo o prazo inicial de três anos para a realização das obras terrestres (ACP Carvão, 2023).

Atualmente 13 áreas de mineração acham- se revegetadas, totalizando aproximadamente 320 hectares, sendo monitoradas pelo grupo técnico do SATC. Tais áreas pertencem às empresas Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Carbonífera Criciúma e Carbonífera Catarinense (ACP Carvão, 2023).

A legislação mais recente sobre carvão mineral é a Lei Nº 14.299 (05/01/2022), que altera as Leis Nº 10.438 (26/04/2002) e 9.074 (07/07/1995) para a instituição da subvenção econômica às concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica de pequeno porte, além de criar o Programa de Transição Energética Justa (TEJ); e dá outras providências.

A referida Lei, em seu artigo quarto, § 1º, prediz que o TEJ objetiva preparar a região carbonífera catarinense para provável encerramento da atividade de geração termelétrica, a carvão mineral nacional, sem abatimento da emissão de CO₂, até 2040, com consequente fim da exploração do minério na região, para esse fim, de modo tempestivo, sustentável e responsável.

2.3. Mineração de carvão: Presença de elementos-traço e contaminação dos solos e corpos d'água

A mineração é uma atividade econômica essencial, mas gera enormes volumes de rejeitos que podem apresentar elementos-traço tóxicos, propensão a quebras de partículas por meio de compactação e degradação rápida por ciclos de umedecimento-secagem o que contribui para o aceleramento das reações de oxidação e dissolução gerando drenagem ácida de mina (DAM), além de possuírem potencial para combustão espontânea (VO et al., 2022).

Elementos-traço (ET's) como Sb, Se, Pb, Ni, Hg, Cu, Co, Cd, As, são relatados associados a sulfetos, podendo ser encontrados em solos e em corpos de águas, nas áreas de mineração. Reações químicas de oxidação podem acontecer tanto nas cavas construídas para extração e nas pilhas de rejeitos advindas do beneficiamento do carvão mineral, quanto nos solos construídos (XIONG, 2022).

Se a DAM atingir os corpos de água ocasionará declínios significativos na biodiversidade dos organismos aquáticos (KAUR et al., 2018). Normalmente solos de áreas de mineração são ácidos e esta acidez é provocada pela oxidação da pirita (FeS_2) durante processo de oxidação, gerando como subproduto ácido sulfúrico (H_2SO_4) responsável por gerar a DAM, que em geral, é caracterizada por apresentar altos teores de ET's e valor de pH menor que 4 (XIN et al., 2021).

A DAM pode apresentar altas concentrações de ET's e sulfatos, que podem contaminar solos e águas subterrâneas e superficiais (GAO et al., 2019). CHOPARD et al. (2017) afirmam que apesar do FeS_2 ser o mais conhecido mineral gerador da DAM, ele não é o único, tendo outros como a galena (PbS); gersdorrita ($NiAsS$); calcopirita ($CuFeS_2$); arsenopirita ($FeAsS$) e esfalerita, também conhecida como blenda $[(Zn,Fe)S]$ que também podem estar presentes na formação da DAM.

Os elevados teores de ET's e a alta acidez afetam as atividades dos microrganismos presentes no solo, sendo que a toxicidade ocasionada pela DAM pode acarretar efeitos danosos permanentes no meio ambiente, necessitando de planos de remediação ao mesmo (FERREIRA et al., 2021). Os baixos valores de pH observados na DAM, favorecem crescimento de microrganismos, os quais aceleram as reações de oxidação, como exemplo a presença de bactérias acidófilas que oxidam elementos como S e Fe (KADNIKOV et al., 2019; MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014)

A DAM pode apresentar elementos como Mn, Al e Fe em significantes quantidades que podem variar de 100-3000 $mg.L^{-1}$ e altas dosagens de sulfetos ($2000\ mg.L^{-1}$), que dependendo do nível de contaminação, estes passivos ambientais podem permanecer no meio por muitos anos (GIACHINI et al., 2018).

Os impactos ambientais da atividade de mineração começam antes mesmo do início da atividade em si pois há a retirada da vegetação, de maneira completa, e do solo da superfície, ocasionando graves riscos ao meio ambiente, além do deperecimento nas propriedades do solo e da contaminação gerada pelos ET's (DOMÍNGUEZ-HAYDAR et al., 2018).

No processo de extração do carvão a compactação do solo resulta da utilização de maquinários, sendo que a recomposição topográfica da área minerada e a carência de sistemas de drenagem são graves problemas para reabilitar as áreas degradadas, visto o solo ficar exposto a erosão e ao difícil reestabelecimento da vegetação, ocasionada pela contaminação por parte dos ET's (STUMPF et al., 2016). A restauração das áreas posteriormente a mineração implica em intermediações, abrangendo a reconstrução do solo, tornando um desafio o estabelecimento da vegetação no local (ROCHA-NICOLEITE et al., 2018).

Na extração de carvão, minerais como a arsenopirita, calcopirita, pirita, entre outros, acaba gerando a DAM, intensificando o processo de intemperismo, produzindo significativas quantidades de minerais nos solos e nas águas (BLANCO et al., 2022). ET's como Pb e Cd, podem ocasionar toxicidade ao meio e à saúde humana, devido ao grau de exposição ao considerar níveis que superam os recomendados pelos órgãos de saúde (LI et al., 2020).

2.4. Pb e seus efeitos na saúde humana

A presença de ET's no corpo humano pode acarretar no desencadeamento de inúmeros tipos de doenças, como: distrofia muscular, esclerose múltipla, mal de Parkinson, Alzheimer, cefaleias agudas, gastrite, anorexia, entre outros (SUN et al., 2018).

Algumas substâncias inorgânicas podem apresentar uma grande ameaça à saúde humana e conforme a ATSDR (2022) o Pb é a segunda substância, perdendo apenas para o As em uma ordem de prioridade conforme análise de risco, em uma lista de mais de 700 substâncias.

O Pb acarretou sérios problemas ocupacionais e evidências de casos de envenenamento, por ingestão, datam desde antes de Cristo, visto que a produção industrial utilizando o elemento começou em torno de 5.000 anos, sendo descrito por Hipócrates (370 A.C) um ataque de cólica em um extrator deste metal (GIDLOW, 2015).

Dioscórides (100 D.C) percebera que, ingerir compostos contendo Pb, levava a cólicas, paralisia e até possíveis delírios e o médico italiano Bernardino Ramazzini, diagnosticou que ceramistas que trabalham com Pb, inicialmente apresentam tremores nas mãos, que com o passar do tempo progride para paralisias do membro (GIDLOW, 2015).

A exposição ao Pb é diretamente responsável por cerca de 30%, a nível global, de deficiência intelectual correspondente ao desenvolvimento idiopático (OMS, 2021). Conforme NAKATA et al. (2022) a poluição ocasionada pelo elemento e a exposição ao Pb, pelos humanos, é uma questão preocupante e que merece atenção da comunidade internacional, visto associar-se a uma média de 0,90 milhões de mortes por exposição a longo prazo.

Há muitas fontes com potencial poluidor por Pb, como: gasolinas que contêm Pb; canos de água; produtos de limpeza; tintas; cerâmicas; baterias; lixos eletrônicos (OBENG-GYASI, 2019). Além destes, conforme GALL et al. (2015) o Pb também é usado como pesticida durante cultivo de hortaliças e frutíferas.

O Pb ocasiona vários problemas ao ser humano, a saber: ele atua como análogo do Ca, em relação ao sítio de ligação do elemento no organismo humano, o que permite que o elemento seja absorvido facilmente em humanos que apresentam deficiências de Ca, Fe e Zn no organismo; afeta os sistemas reprodutivos dos homens e mulheres, havendo nos homens uma redução no volume de SPTZ's, além da mobilidade e morfologias dos mesmos serem alteradas (COLLINS et al., 2022).

Em mulheres, muito expostas ao elemento, são verificados abortos espontâneos ou partos prematuros, baixo peso dos recém-nascidos, além disso o Pb pode gerar danos a estrutura celular, atingir a membrana celular e interferir negativamente na transcrição do DNA (COLLINS et al., 2022).

Pessoas expostas ao Pb, em especial crianças e bebês, estão mais propensas aos potenciais riscos neurotoxicológicos, ocasionados pelo Pb, que dificultam o correto desenvolvimento dos cérebros das mesmas, podendo levar a graves convulsões, coma ou mesmo a morte, quando em elevadas concentrações (NWACHUKWU et al., 2022). Crianças e bebês também são mais predispostos, quando comparados aos adultos, a contaminação por Pb através da ingestão de alimentos contaminados com o elemento (NWACHUKWU et al., 2022).

Mesmo que hajam baixas quantidades absorvidas de Pb, uma exposição prolongada ao elemento pode gerar acumulação no corpo humano, levando a intoxicações ou toxicidade por Pb, sendo que o mesmo apresenta uma meia-vida de aproximadamente 30 dias no sangue, após este tempo difundindo-se aos tecidos moles como fígado, rins e cérebro e na sequência distribuindo-se para dentes, ossos e cabelos, como $Pb_3(PO_4)_2$ (ENGWA et al., 2019).

A exposição ao Pb pode levar a diversos riscos, que vão desde problemas gastrointestinais, neoplasia, pressão alta, anemia, supressão da medula óssea e convulsões (CHOWDHURY, 2022). Como resultado do envenenamento por Pb, são produzidas espécies reativas de oxigênio como peróxido de hidrogênio, oxigênio singuleto e hidroperóxido, sendo que tais radicais livres ocasionam estresse oxidativo danificando ás células do corpo (COLLINS et al., 2022).

O estresse oxidativo leva a destruição de tecidos, o que eleva as probabilidades de resultados adversos à saúde dos indivíduos, como doenças renais, cardiovasculares e desenvolvimento de diversos tipos de cânceres (COLLINS et al., 2022).

Dados da OMS (2021) indicam que o valor direutivo do elemento Pb é em torno de 0,01 mg.L, sendo 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (micrograma por decilitro) em adultos e 1,4 $\mu\text{g}/\text{dL}$ em crianças, o máximo permitido. OLEKO et al. (2022) relatam efeitos, em crianças, como irritabilidade, diminuição da função cognitiva, comportamento alterado que pode gerar dificuldades na aprendizagem, função neuromotoras e neurosensoriais alteradas, neuropatia periférica e encefalopatia (WANI et al., 2015).

2.5. Potencial fitorremediador das samambaias

A técnica de fitorremediação baseia-se no uso de plantas para remoção de diversos poluentes orgânicos e inorgânicos da água e/ou solo, sendo que a retirada de ET's pode ser alcançada, com sucesso, com o uso de plantas hiperacumuladoras, visto conseguirem sobreviver em águas ou solos com elevados níveis de contaminantes. Entre as plantas fitorremediadoras há as hiperacumuladoras que podem ser cultivadas, de maneira natural, em lugares contaminados ou são plantas transgênicas com genes benéficos incorporados em si (YADAV et al., 2018).

Para que plantas consigam sobreviver a altas concentrações de ET's é necessário que limitem a entrada de tais metais em seu citosol, que, em geral, ocorre através de duas técnicas: a primeira é feita, com mecanismos de defesa, como sorção de raízes e precipitação de íons, isso reduz a biodisponibilidade dos metais e restringe o movimento dos mesmos para a célulavegetal (YAN et al., 2020).

A segunda técnica de defesa é a tolerância, que protegerá a célula vegetal da toxicidade dos íons metálicos presentes no meio. Quando o íon metálico entra na célula ocasiona um desencadeamento de processos. Os processos gerais incluem precipitação, solubilização, quelação, biometilação e volatilização de ET's (YAN et al., 2020).

A rizorremediação é o primeiro passo da fitorremediação, onde as raízes extraem os ET's, translocando-os para brotos e folhas. Neste cenário os microrganismos, como fungos micorrízicos arbusculares (FMA's) e das rizobactérias, tornam-se ativos na rizosfera, sendo que ácidos orgânicos, açúcares e outros compostos orgânicos, produzidos por tais simbiontes, agem como quelantes dos metaloides e metais, onde estes produtos químicos precipitaram os ET's, reduzindo as frações biodisponíveis dos contaminantes (MUDGAL et al., 2022).

Os autores complementam com a fitoestabilização ao inferirem que os metais não serão completamente degradados, logo imobilizá-los *in situ* é um modo de tratar a poluição, sendo bem útil em áreas de mineração objetivando prevenir erosão do solo, lixiviação e melhorar a fertilidade do meio (MUDGAL et al., 2022).

Transformar contaminantes em formas mais estáveis, que apresentam menos mobilidade e sejam menos tóxicas pelas enzimas vegetais, dependerá da composição dos poluentes e das espécies dos vegetais, sendo que contaminantes orgânicos como pesticidas e petroquímicos são fitodegradados com enzimas oxigenases e hidrolases (ANSARI et al., 2018).

Ainda em relação aos contaminantes, YAN et al. (2020) acrescentam que através da transpiração, as partes aéreas das plantas, liberam os poluentes fitodegradados em uma forma volátil menos tóxica.

Em estudos sobre o comportamento cromossômico mitótico e propriedades bioquímicas de duas espécies de samambaias (*Thelypteris interrupta* (Wild.) K. Iwats e *Thelypteris dentata* (Forssk. EP St. John) em resposta aos efeitos de distintas concentrações de Pb e Cu, PAL e SUKUL (2022) analisaram valores dos índices mitóticos e das propriedades de aberração mitótica encontradas nas células presente nas pontas das folhas em crescimento de ambas as espécies, obtendo como resultado, para ambas espécies, em relação a acumulação dos ET's, não ter ocorrido influência negativa no desenvolvimento das espécies (PAL e SUKUL, 2022).

Plantas bioacumuladoras (tabela 2) apresentam capacidade de bioconcentrar ET's em seus tecidos, em um fator de bioconcentração que varia de 50 a 450 para Pb (LEAL-ALVARADO et al., 2017). Ainda os mesmos autores, em estudos com a samambaia *Salvinia minima*, mostraram que o Pb bioacumulado não manifestou efeitos visíveis nas folhas, mas alterou o processo de fotossíntese. Porém, como *S. minima* é aquática, foi preciso expô-la ao Pb e identificar os genes que elevaram sua expressão em resposta ao elemento.

Tabela 2: Alguns exemplos de plantas que podem ser utilizadas para remediação de solos contaminados com Pb.

Nome	Família	Tipo	Características
Samambaia	Dennstaedtiaceae	Pteridófitas	Exposição solar: semi-sombra a sombra; Umidade: média a alta.
<i>Sedum alfredii</i>	Crassulaceae	Herbáceo	Exposição solar: semi-sombra; Tolerância: subtropical, tropical; Umidade: úmida.
Vinca-de-Madagáscar	Poaceae	Grama perene	Exposição solar: sem sombra, meia-sombra; pH: ácido, neutro, alcalino.
Mostarda-dos-campos	Fabaceae	Planta perene	Exposição solar: sem sombra; Tolerância: solo seco e pobre.

Fonte: O Autor (2023).

2.6. *Pteridium arachnoideum*

A *Pteridium arachnoideum* também conhecida como samambaia das taperas, samambaia do campo ou samambaião, apresenta distribuição por todo o território das regiões Sudeste e Sul, aparecendo em parte das regiões Norte e Nordeste, sendo considerada nativa dos biomas Mata Atlântica e Cerrado (SCHWARTSBURD et al., 2014).

É uma espécie perene que apresenta rizoma profundo e bem ramificado, com folhas que atinge de 1,5 a 3m de comprimento. Os exemplares desta espécie, devido ao hábito de crescimento do rizoma, podem cobrir grandes áreas, criando touceiras atrapalhando o desenvolvimento de outros vegetais (OLIVEIRA, 2018). A classificação botânica da espécie se encontra na figura 1.

Figura 1: Classificação botânica da *Pteridium arachnoideum*.



Fonte: O Autor (2023).

As *Pteridium* são heliófitas cosmopolitas, que estão presentes em todos os continentes da Terra, com exceção da Antártida, sendo que plantas deste gênero apresentam alta plasticidade fenotípica com diversos intermediários morfológicos (JATOBÁ et al., 2016).

Até o final da primeira década deste milênio, o gênero apresentava duas subespécies (*P. aquilinum* ssp. *aquilinum* e *P. aquilinum* ssp. *caudatum*), sendo que quatro variedades foram reconhecidas dentro da subespécie *caudatum*, encontradas na Oceania, Ásia, Américas do Sul e Central e oito da subespécie *aquilinum*, encontradas na Europa. Revisar a sistemática complexa destas espécies fez surgir uma nova classificação taxonômica, infragenérica, pautada na ploidia cromossômica e no DNA da mitocôndria, assim a *P. arachnoideum* é uma espécie separada conforme tal classificação (JATOBÁ et al., 2016).

O Chile é o único país das Américas que não possui *P. arachnoideum*, provavelmente devido a barreira criada pelos Andes e dos desertos do Norte, sendo que os fortes ventos advindos do Pacífico dificultam dispersão dos esporos que poderiam sair de países fronteiriços como Bolívia ou Argentina (HOJO-SOUZA et al., 2010).

A *P. arachnoideum* infesta, em especial, solos de baixa fertilidade e ácidos, pastagens, campos nativos, clareiras de matas e beiradas de estradas, podem também ser encontradas em áreas agrícolas como lavouras recém instaladas ou pouco lavoradas, além do fato de o desmatamento e/ou transformação de grandes áreas para utilização agropecuária ter contribuído para disseminação da espécie (OLIVEIRA, 2018).

Samambaias pertencentes ao gênero *Pteridium* são consideradas altamente invasoras devido à sua tolerância natural as condições ambientais adversas, juntamente com o manejo incorreto praticado pelos homens nos distintos ecossistemas terrestres. Segundo MILLIGAN et al. (2018) a *P. arachnoideum* é uma espécie que produz elevada biomassa tanto acima, quanto abaixo do solo, além de apresentar uma espessa camada de serrapilheira que pode desenvolver repelência a água e baixa taxa de infiltração ocasionada devido a presença de compostos hidrofóbicos, advindos de plantas no solo, como fenóis.

Em estudos com *P. arachnoideum* em zonas ribeirinhas, a samambaia apresenta a possibilidade de invadir biologicamente as matas ciliares, perturbando o ecossistema local podendo afetar negativamente a diversidade e a composição de espécies da biota (FILHO et al., 2022).

As espécies de samambaia pertencentes ao gênero *Pteridium* possuem boa adaptação a uma grande faixa de condições edafoclimáticas e apresentam ocorrência desde o nível do mar até altitudes acima de 3.500 metros, porém sua agressividade é maior em regiões subtropicais e temperadas, podendo ser encontradas em solos bem drenados, em encostas de morros e em solos ácidos, sendo considerada uma planta indicadora de acidez do solo (TOKARNIA et al., 2012).

Os compostos polifenólicos, em samambaias do gênero *Pteridium*, são a principal classe química de metabólitos secundários, dentre os quais destacam-se os taninos condensados, como advindos de prodelfinas ou de proantocianidina, sendo os principais, sendo que tais substâncias protegem contra a radiação ultravioleta (JATOBÁ, 2016).

O rizoma cresce horizontalmente, sendo o mesmo subterrâneo, cilíndrico, vascularizado e ramificado, podendo atingir vários metros quadrados de área. Raízes filamentosas desenvolvem-se dos rizomas, sendo que destes emergem as frondes (folhas) com pecíolos longos, trazendo no ápice o limbo circinado (enrolado) que apresenta consistência coriácea e coloração verde escurecida na face adaxial (superior) e verde claro na abaxial, tornando acinzentadas ou amarronzadas quando secam (SCHWARTSBURD et al., 2017).

Para a correta taxonomia da planta, os tricomas (pelos) localizados na parte abaxial são fatores importantes para a classificação (THOMSON, 2012). As divisões iniciais dos limbos são denominadas de pinas, as segundas, pínulas, asdemais são pínulas de segunda ordem, de terceira ordem, até os segmentos, entre os quais podem existir lobos livres, importantes para correta identificação da *P. arachnoideum*.

Samambaias não produzem flores e frutos, elas formam soros, conjunto de esporângios, onde são produzidos esporos, que são diásporos e deverão germinar formando gametófitos masculinos e femininos, onde a fecundação de dois gametas gerará uma nova samambaia (JATOBÁ et al., 2016).

Os esporos liberados germinam em 6 a 7 semanas, sendo possível o estabelecimento de jovens samambaias e a colonização de novas áreas, já outros podem permanecer viáveis por até dez anos (GRIME et al., 2018). A figura 2, mostra várias fases do ciclo de vida da *P. arachnoideum*.

Figura 2: Em sentido horário: Plantas jovens e adultas de *P. arachnoideum*; Soros localizados na parte abaxial das frondes, contendo esporos; Serrapilheira, rizomas e Brotos em estádio juvenil com limbos enrolados.



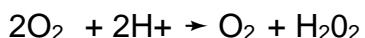
Fotos: Alexandre M. Brighenti, Marcos L. La Falce, Pedro B. Schwartsburd. Fonte: Embrapa Gado de Leite (2018).

2.7. Mecanismos fisiológicos das samambaias para tolerar ET's

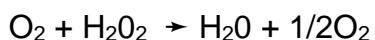
As samambaias são consideradas uma das famílias mais antigas do reino Plantae, sendo as pioneiras das plantas vasculares terrestres a evoluírem no decurso dos períodos Devoniano e Carbonífero (BAJRACHARYA e BAJRACHARYA, 2022). Foram as pteridófitas que dominaram a vegetação do planeta logo no início da era Mesozóica, por volta de 230 a 280 milhões de anos atrás (THAKUR e RAJBHANDARY, 2018). As samambaias continuam a fazer parte de florestas, mananciais de águas e terras de cultivo e de pastagem atuais (CAI et al., 2021).

Até recentemente haviam poucos estudos, em relação aos genes, de samambaias ocasionado aos seus grandes números de cromossomos e genomas, porém pesquisas evolutivas, fisiológicas e em especial genômicas, demonstraram que tais plantas evoluíram adquirindo inovações importantes, como tecidos vasculares, esporos, lignina, genes e metabólitos para proteção contra insetos, predadores, patógenos, assim como para defesa contra estresse abiótico, como a presença de ET's no solo e da seca (CHEN, 2022).

Em estudos sobre o potencial fitorremediador de samambaias para As, OLIVEIRA (2012) constatou que o ET apresenta grande afinidade com sulfetos, aparecendo juntamente com o Pb e outros ET's. O As presente no solo pode advir de fontes naturais ou antropogênicas como a fundição de Pb, combustão de carvão, entre outros. Uma das respostas antioxidativas da samambaia ao estresse, pelo elemento-traço, dentro da célula é a atuação da superóxido dismutase, reduzido O₂ pela conversão do O₂ em H₂O₂, conforme equação abaixo.



A enzima catalase promoverá a conversão do peróxido de hidrogênio em água e oxigênio molecular, conforme equação abaixo.



As peroxidases que degradam o H₂O₂ encontram-se nos peroxissomos, mitocôndrias, cloroplastos, citosol, vacúolos, apoplasto e na parede celular, sendo que sob elevadas concentrações de ET's, que podem estar na forma iônica, as samambaias hiperacumuladoras mantêm o sistema antioxidante ativo (OLIVEIRA, 2012).

A primeira samambaia a ser descrita como hiperacumuladora de ET's, conforme MA et al. (2001) foi a *Pteris vittata* L., apresentando potencial como planta extratora e acumulando elevadas quantidades de ET's na parte aérea, sem comprometer a produção de biomassa.

Samambaias para serem hiperacumuladoras devem apresentar elevadas taxas de acumulação, segundo MA et al. (2001), mesmo quando estes forem em baixa concentração no solo, acumulando concomitantemente vários ET's e ainda assim serem capazes de apresentar bom crescimento e produção de biomassa, sendo possível a realização dos cálculos dos fatores de bioacumulação (FB) e de translocação (FT), conforme equações abaixo.

$$FB = \text{teor do ET na planta} / \text{teor do ET na solução}$$

$$FT = \text{teor do ET na parte áerea} / \text{teor do ET na raiz}$$

O FT indica a eficiência da samambaia em translocar dado ET do sistema radicular para a parte aérea e o FB analisa a eficiência da samambaia em acumular os ET's, considerando as concentrações destes no meio. O FB apresenta uma característica importante: quanto maior for seu valor, maior será a capacidade de transferência de dado ET da solução do solo para a samambaia e, em consequência, maior será a capacidade da planta em remover ET's do meio (OLIVEIRA, 2012).

Em estudos com samambaias e sua tolerância a ET's, como o Pb, RAHMAN et al. (2018) identificaram que *Salvinia natans*, pode limpar águas contaminadas com elevados teores de Pb entre 4 a 9 mg.g⁻¹ de peso seco. ZHAN et al. (2018) demonstraram que *Athyrium wardii* apresenta FB de Pb em torno de 20 a 78%, indicando maior potencial de fitoestabilização da contaminação do solo com Pb.

Em revisão sobre plantas acumuladoras de ET's nos solos, ALMEIDA (2012) constatou que há uma grande diversidade de espécies de plantas, como samambaias, juncos mansos, sapé, entre outras, que retiram e acumulam ET's dos solos, sendo que tal capacidade associa-se a mecanismos bioquímicos, como: produções intercelulares de compostos ligantes como ácidos orgânicos e aminoácidos e seus derivados.

Em estudos com FMA's para melhorar o crescimento e acúmulo de As em *P. vittata*, LEUNG et al (2013) constataram que nas estruturas como hifas e vesículas o As foi depositado principalmente nas células do parênquima da raiz da samambaia, demonstrando que a planta tem, tanto habilidade em acumular As, quanto em reter o ET no acumulador de metal micorrízico.

FMA's são associações entre fungos e raízes, que atuam na estimulação e produção de hormônios vegetais pelas plantas, na melhoria da qualidade física do solo, como exemplo, alterando a estabilidade dos agregados e a porosidade do solo (BARBOSA et al., 2019).

Sob condições inóspitas as plantas se beneficiam quando associadas aos FMA's, pois eles elevam via a formação do micélio extrarradicular, a capacidade de exploração do solo, protegendo-as assim contra o ambiente adverso (SMITH, READ, 2010).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVOS GERAIS

Realizar revisão bibliométrica sobre mineração de carvão e a utilização de samambaias como fitorremediadoras e avaliar o potencial fitorremediador da samambaia *Pteridium arachnoideum* em área de depósito de carvão em SC.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar revisão bibliográfica sobre mineração do carvão e o uso de samambaias apresentando potencial fitorremediador de áreas degradadas pela mineração de carvão;

Analizar os teores de Pb presentes nos estéreis e rejeitos e no tecido da samambaia *Pteridium arachnoideum* encontrada nas áreas alvo do presente estudo;

Analizar a presença de Fungos Micorrízicos Arbuculares nas raízes da samambaia *Pteridium arachnoideum* encontrada nas áreas alvo do presente estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. 1ª Parte: Revisão bibliométrica

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliométrica sobre a questão norteadora da mesma: “Quais as potencialidades da utilização desamambaias na recuperação de áreas degradadas pela atividade de mineração de carvão?”. A delimitação da pesquisa foi do ano de 2002 até 2022, tendo um banco de dados de 20 anos. Sendo que foram excluídos artigos de conferência, livros, capítulos de livros e outros tipos de publicações.

As pesquisas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Web of Science (WOS), a partir de janeiro de 2023. As buscas de artigos se deram por meio de palavras-chave presentes no título do artigo, no resumo e nas palavras-chave para a base Scopus (SCOPUS, 2017) e selecionou-se a opção “tópicos”, correspondente à presença das palavras que aparecem no título, no resumo e nas palavras-chave plus e palavras-chave do autor, para a base WOS.

O portfólio bibliográfico fora composto através da seleção de palavras chaves combinadas a operadores booleanos, sendo que para a Scopus utilizamos: (“fern” AND “phytoremediatiON” AND “mining”) OR (“coal mining” AND “fern” AND “lead”), retornando 55 publicações, onde três eram capítulos de livros e uma conferência, logo obtivemos 51 artigos.

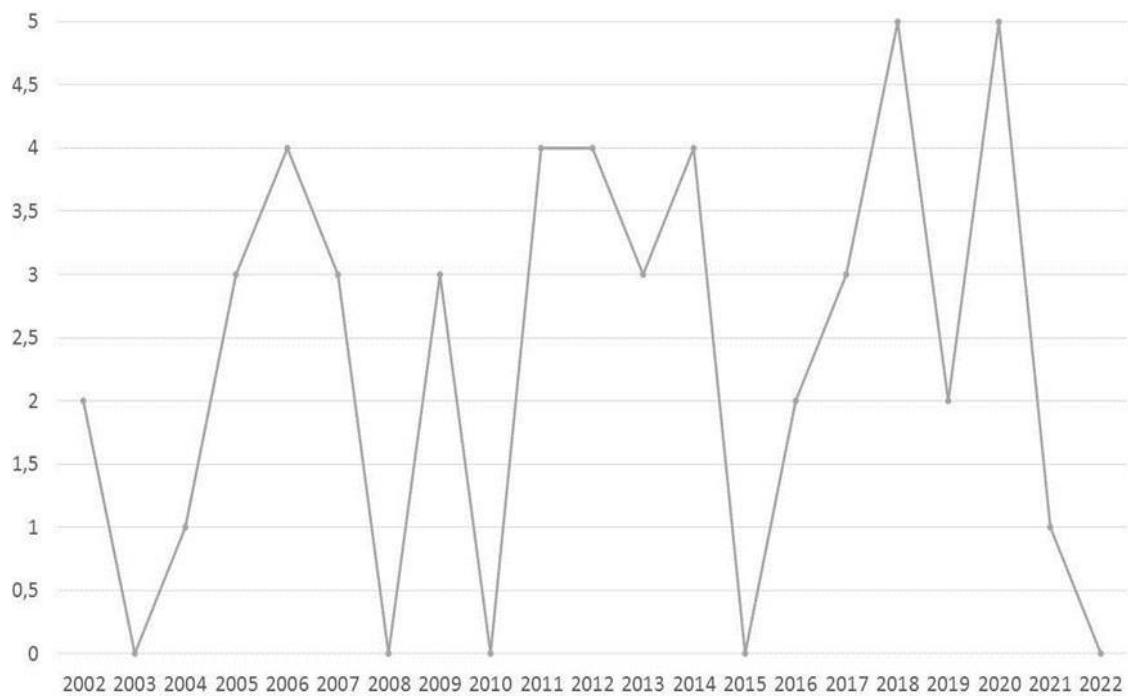
Na base de dados da WOS os mesmos termos, ou seja, (“fern” AND “phytoremediatiON” AND “mining”) OR (“coal mining” AND “fern” AND “lead”) retornaram 3 e 1 artigo, respectivamente, os quais, porém já haviam aparecidos na Scopus, continuando apenas 51 artigos.

O uso dos termos OR e AND, conforme VISENTIN et al. (2019), são indispensáveis para a busca. O termo OR indica que pelo menos um dos termos pré-definidos deve aparecer nos resultados da pesquisa e o termo AND indica que todos os termos utilizados devem aparecer nos resultados da pesquisa, sendo que para ambas as pesquisas (Scopus e WOS) foram usados os mesmos procedimentos.

Na análise bibliométrica foram avaliados países, áreas temáticas, financiadores das pesquisas e os periódicos. A análise sistemática abordou detalhes em cada um destes tópicos como quais países tem publicações sobre o tema; quais as áreas temáticas se destacam em relação ao assunto; quem são os financiadores das pesquisas e quais periódicos destacam-se com mais publicações.

Os 51 artigos encontrados para os termos inseridos na base Scopus, são mostrados na figura 3.

Figura 3: 51 artigos, de 2002 a 2022, encontrados para os termos “fern”, “phytoremediation” e “mining”, na base de dados Scopus.



Fonte: O Autor (2023).

4.2. 2^a Parte: Avaliação do acúmulo de Pb no tecido da samambaia *P. arachnoideum*

O presente estudo deu-se em cinco municípios da Bacia Carbonífera Catarinense (BCC): Criciúma, Forquilhinha, Lauro Müller, Siderópolis e Urussanga, todos integrantes da Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC).

BCC é a denominação da unidade geomorfológica, que ocupa uma área de aproximadamente 1.659 Km², localizada no extremo sul de SC, em uma faixa alongada na direção Norte – Sul, sendo os Argissolos e os Cambissolos, os solos mais representativos da região, com aproximadamente 43,1% e 24,22%, respectivamente (EPAGRI, 2022).

A geologia da região encontra-se enquadrada no Grupo Guatá que se compõe de camadas de carvão e sedimentos não-glaciais, apresentando duas formações: a formação superior (Palermo) constituída por sítios arenosos, siltitos e folhelhos silticos, e a formação inferior (Rio Bonito) de origem flúvio-deltaicos, com seção arenosa (base), argilosa (intermediária) e areno-argilosa (superior) abarcando camadas de carvão (MAAHS et al., 2019).

O clima para as cidades de Criciúma, Forquilhinha e Urussanga é do tipo Cfa e para Lauro Müller e Siderópolis do tipo Cfa e Cfb, conforme classificação climática de Köppen. Predominantemente a região enquadra-se como Cfa, ou seja, mesotérmica, úmida, com verões quentes, apresentando variações significativas de temperatura média do mês mais quente > 22 °C (EPAGRI, 2022).

Consoante o banco de dados de informações ambientais Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o bioma de SC é a Mata Atlântica, abrangendo quase a totalidade do Estado, sendo que neste ecossistema inclui-se a Floresta Ombrófila Densa (FOD), também conhecida como floresta tropical pluvial, entre o planalto da Serra Geral e o oceano Atlântico, em altitudes que chegam a 1.000m. Na FOD encontram-se diferentes formações, como: Floresta das Terras Baixas, Submontana, Montana e Altomontana, sendo que as áreas do presente trabalho se encontram localizadas entre 5 e 30 metros de altitude (Terras Baixas) e a 30 e 400m acima do nível do mar (IBGE, 2022).

A samambaia avaliada na presente pesquisa foi a *Pteridium arachnoideum*, encontrada em todas as áreas dos cinco municípios, sendo que tais áreas se caracterizaram por possuírem rejeitos brutos e não sofreram nenhum tipo de procedimento de recuperação. A coleta, identificação da samambaia, análise química dos estéreis e rejeito piritoso, análise do tecido da planta, foram obtidos da tese de doutorado de ANDREOLA (2015).

Os parâmetros usados para a escolha dos cinco municípios deram-se devido aos mesmos possuírem relevante influência das atividades de mineração, com diversos depósitos de estéreis e rejeitos prejudicados por causa da degradação ocasionada pela mineração de carvão. A tabela 3 detalha características das áreas dos cinco municípios, apresentando uma breve descrição das áreas, identificando-as e mostrando a idade aproximada de cada uma delas.

Tabela 3: Descrição das áreas dos cinco municípios catarinenses.

Municípios e Áreas	Idade aproximada	Identidade da área	Descrição da área
(A1) Urussanga	39 anos	Setor Santana Encosta área 3	Depósito de fino e ultrafino de carvão; depósito de estéril
(A3) Urussanga	39 anos	II Área 4	Depósito de fino e ultrafino de carvão
(A5) Lauro Müller	47 anos	Rocinha	Depósito de rejeito piritoso
(A7) Siderópolis	49 anos	Língua do Dragão	Depósito de fino e ultrafino; recebe efluente de outras cavas situadas próximas
(A8) Criciúma	49 anos	Bairro Colonial	Depósito de estéril
(A9) Criciúma	49 anos	Bairro Sta Luíza	Dep. de resíduo sólido urbano e de estéril
(A11) Forquilhinha	59 anos	Dep. de rejeito	Bacia de decantação de fino e ultrafino de carvão; incidência de DAM nas margens
(A12) Lauro Müller	47 anos	Área dez	Depósito de estéril
(A22) Siderópolis	49 anos	Mina do Trevo	Mina a céu aberto com presença de camada de solo na superfície cobrindo rejeito-piritoso
(AT) Urussanga	—	Testemunha	Barranco de beira de estrada

Fonte: Adaptada de ANDREOLA (2015)

Para a realização da amostragem foi realizado, através de caminhamento, coleta de *P. arachnoideum*. Pás retas e curvas foram usadas para a coleta da samambaia por completo objetivou conservar propriedades das plantas, como o sistema radicular e as frondes, permitindo identificação inicial da espécie, a partir das anotações dos caracteres morfológicos e taxonômicos.

O material foi acondicionado em sacos plásticos identificados e mantidos abertos para impedir possíveis danos nas samambaias, além de manter o rejeito piritoso e o solo presente no sistema radicular e a estrutura das plantas conservadas durante o transporte dos cinco municípios a UDESC. As samambaias foram transportadas ao Laboratório de Levantamento de Análise Ambiental (LLAA) do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV UDESC.

O rejeito piritoso e o solo foram secos em estufa por 24 h a 60 °C, sendo moídos e passados em peneira de 2 mm. Para caracterizar o rejeito e solo foram determinados pH em água, utilizando-se uma relação solo/solução de 1:1, teores de P, K e Na pelo método Mehlich; Ca, Mg e Al com solução KCl 1 mol L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995) e MO (WALKLEY; BLACK, 1934). Os teores de argila foram determinados pelo método EMBRAPA (1997).

A tabela 4 apresenta a caracterização do rejeito piritoso da mineração de carvão nos 09 depósitos e do solo da testemunha (AT), seguindo o apresentado em ANDREOLA (2015) e ANDREOLA et al. (2022).

Tabela 4: Caracterização do rejeito piritoso da mineração de carvão nos 9 depósitos e do solo na área sem interferência da mineração, na Bacia Carbonífera Catarinense. Média dos valores (*).

Área	pH	pH	Ca	Mg	K	Na	SB	Al	P	M.O	Ar.
	água	KCl					Cmolc.kg ⁻¹		mg.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	
A1	2,8	2,8	3,2	0,1	1,0	0,1	4,5	7,3	3,3	56	180
A3	3,0	2,7	6,3	0,1	0,1	0,1	6,7	7,3	2,1	46	140
A5	2,7	2,5	5,7	0,1	0,1	0,1	6,0	7,0	3,2	56	150
A7	2,5	2,4	3,6	0,1	0,1	0,1	3,9	5,2	2,7	93	190
A8	3,2	3,0	4,7	0,1	0,1	0,2	5,0	5,3	1,5	37	340
A9	2,2	2,4	3,2	0,1	0,1	0,1	3,5	9,7	2,5	93	400
A11	3,0	2,8	4,9	0,1	0,1	0,2	5,3	8,0	1,9	24	240
A12	3,0	2,8	3,7	0,2	0,1	0,1	4,1	9,5	2,7	30	180
A22	2,8	2,7	3,1	0,1	0,1	0,2	3,2	4,1	12,4	26	220
AT2	4,3	3,9	4,5	0,1	0,2	0,2	5,0	1,5	2,3	18	190

Fonte: ANDREOLA et al. (2022) adaptada pelo autor.

Os teores totais de Pb no solo e planta foram obtidos seguindo o protocolo USEPA (1994), método 3051 A e a quantificação em espectrômetro deabsorção atômica, com atomização em chama ar-acetileno CONTRA A 700® (ANALYTIK JENA). A tabela 5 apresenta os teores de Pb para a amostrareferência e o limite de detecção instrumental.

Tabela 5: Valores certificados e recuperados para Pb da amostra referência NIST SRM 2709 A (San Joaquin Soil) e Limite de detecção e quantificação operacionais, LDO respectivamente.

Elemento	NIST SRM 2709	recuperação do NIST	LDQ
	certificado		
		mg.kg ⁻¹	mg L ⁻¹
Pb	29 ± 0,1	95,37	0,0718

Fonte: O Autor (2023).

Para a análise de micorrizas foi utilizado o protocolo de coloração para raízes colonizadas com micorrizas arbusculares fornecido pelo Department of Plant Science da Penn State College of Agricultural Sciences.

As análises estatísticas foram realizadas através do software R® CORE TEAM (2022). Os teores de Pb foram analisados no solo, no sistema radicular e na parte aéreada espécie de samambaia *Pteridium arachnoideum*, utilizando-se o teste de Tukey a 5% de nível de significância.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Revisão bibliométrica

Para os termos "coal mining", "fern" e "lead" a base de dados WOS retornou apenas um resultado: o artigo "Ferns and lycophytes in coal mining waste and tailing landfills" (ANDREOLA et al., 2022). Para os termos "fern", "phytoremediation" e "mining" na WOS, retornaram três resultados (tabela 6).

Tabela 6: Artigos encontrados na base de dados WOS para os termos "fern", "phytoremediation" e "mining", de 2002 a 2022.

Título	Periódico	Data
Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water	Environmental Science And Pollution Research	2021
Smaall-scale and household methods to remove arsenic from water for drinking purposes in Latin America	Science Of The Total Environment	2012
A review of in situ phytoextraction of rare earth elements from contaminated soils	International Journal Of Phytoremediation	2021

Fonte: O Autor (2023).

Para os termos "coal mining", "fern" e "lead" apenas dois: Ferns and lycophytes in coal mining waste and tailing landfills, publicado no periódico Environmental Science And Pollution Research (2022) e Phytomining of rare earth elements - A review, publicado no Chemosphere (2022).

5.2. Países e áreas temáticas

Os países onde foram realizados estudos que resultaram em artigos publicados, os quais compõem este portfólio bibliográfico, são mostrados na tabela 7. O número de países que publicaram sobre o tema é relativamente baixo quando comparado ao fato de que a mineração de carvão e seus efeitos maléficos são sentidos em diversos países que praticam tal atividade. Tal comportamento pode ser fruto da pouca adoção de planos para recuperação das áreas (solos e águas) atingidas pela mineração de carvão e os problemas acarretados pela mesma, como a DAM. Os idiomas utilizados nos 51 artigos foram: inglês (49), mandarim (1) e português (1).

Tabela 7: Quantidade de publicações, de artigos, por países, entre os anos de 2002 a 2022, pela base de dados da Scopus.

Países	Quantidade de publicações
China	29
Índia	05
Austrália	04
Alemanha	03
Coréia do Sul	03
Brasil	02
Espanha	02
Japão	01
Estados Unidos	01
Arábia Saudita	01
Total	51

Fonte: O Autor (2023).

A China apresenta relevante destaque, em quantidade, de produção de artigos sobre carvão mineral devido ao fato de ser o país um dos maiores produtores de GEE produzidos a partir da queima do carvão mineral (LI et al., 2022). Em contrapartida a China é um dos países mais comprometidos quando os assuntos são procedimentos e remediação de áreas degradadas pela atividade de mineração de carvão (SONG et al., 2018).

As áreas temáticas dos artigos são mostradas na tabela 8, as revistas que publicam sobre o tema apresentam foco na área das Ciências Ambientais, tais como ecotoxicologia, desenvolvimento sustentável, ecossistemas, recuperações de áreas degradadas por ET's, dentre outras áreas, incluindo aqui as ciências biológicas (biota, utilização sustentável do meio ambiente, flora e fauna, etc) e agrárias (degradação e restauração dos solos, planos de recuperação de áreas degradadas, etc).

Tabela 8: Número de publicações dos artigos por área temática que compõe o portfólio bibliográfico.

Áreas temáticas	Número de publicações
Ciências Ambientais	13
Ciências Agrárias	6
Ciências Biológicas	4
Química	6
Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	6
Ciências da Terra e Planetária	5
Medicina	4
Energia	2
Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	1
Engenharia Química	1
Imunologia e Microbiologia	1
Multidisciplinar	1
Ciências Sociais	1
Total	51

Fonte: O Autor (2023).

Os financiadores para a realização das pesquisas são mostrados na tabela 9. As empresas de fomento, universidades, órgãos públicos, dentre outros tipos de patrocinadores, possibilitam que as pesquisas científicas sejam realizadas e, por vezes, mantidas durante todo período de execução.

Tabela 9: Financiadores das pesquisas.

Patrocinadores/financiadores	Número de patrocínio
National Natural Science Foundation of China	14
Chinese Academy of Sciences	02
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China	02
Sichuan Province Science and Technology Support Program	02
Sichuan Youth Science and Technology Foundation	02
Zhejiang University	02
China Postdoctoral Science Foundation	01
Guangzhou Medical University	01
Guangzhou University	01
Griffith University	01
National Science and Technology Planning Project	01
Natural Environment Research Council	01
Ruhr-Universität Bochum	01
Scientific Fund of Chinese Universities	01
Sumitomo Foundation	01
Vedecká Grantová Agentúra MŠVVaŠ SR a SAV	01
Outros	
Total	51

Fonte: O Autor (2023).

5.3. Periódicos

As revistas e as respectivas quantidades de artigos publicados encontram-se elencadas na tabela 10. Os periódicos com maiores números de artigos publicados são “Ciência Ambiental e Pesquisa de Poluição”, “Poluição ambiental” e “Quimiosfera” com seis, cinco e quatro publicações, respectivamente, seguidos por “Ciência do Meio Ambiente Total”, “Jornal Internacional de Fitorremediação” e “Diário de Materiais Perigosos”, cada um com três publicações ao longo de 2002 a 2022. Os outros periódicos aparecem com duas ou apenas um artigo publicado.

Tabela 10: Periódicos e respectivas publicações para o período de 2002 a 2022.
NDP= número de publicações.

Nomes das revistas das publicações	NDP
Environmental Science and Pollution Research	06
Environment Pollution	05
Chemosphere	04
Total Environmental Science	03
Hazardous Material Diary	03
International Journal of Phytoremediation	03
Hazardous Material Diary	03
Ecotoxicology and Environmental Safety	02
Pollution of water, air and soil	02
International Journal of Environmental Science and Technology	02
Environmental Monitoring and Assessment	02
Sustainability	02
Hazardous Material Diary	01
Outras	13
Total	51

Fonte: O Autor (2023).

É possível verificar que os periódicos com maiores publicações estão relacionados ao setor da Ciências Ambientais, com foco na recuperação das áreas degradadas e questões relacionadas a poluição ambiental.

Foi possível observar nas buscas dos artigos nas bases de dados Scopus e o WOS, que há poucos trabalhos e pesquisas relacionadas a temática, sendo que de maneira geral, os artigos publicados concentram-se na caracterização das áreas degradadas pela atividade de mineração de carvão e possíveis meios de recuperação de tais áreas. O artigo mais completo sobre a utilização de samambaias em áreas degradadas pela mineração de carvão veio da tese de doutorado de Ariane Andreola, como já citado.

Neste as espécies estudadas, tanto de samambaias quanto de licófitas, encontradas nos estérreos e rejeitos da mineração de carvão, demonstraram resistência às condições inóspitas do ambiente, sendo uma possibilidade para uso em Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD's) nas áreas impactadas pela mineração de carvão. O trabalho de ANDREOLA (2015) é considerado norteador porém estudos futuros, a campo e em laboratório, devem ser feitos para analisar a eficácia das samambaias na recuperação das áreas contaminadas pela mineração de carvão.

5.4. Avaliação do acúmulo de Pb no tecido da samambaia *P. arachnoideum* coletada em áreas de mineração de carvão

Os teores de Pb no rejeito piritoso (RPS), no sistema radicular e na parte aérea (tabela 11) apresentaram correlação linear positiva ($P < 0,05$), indicando que a presença de Pb no RBS condiciona a presença no tecido da planta.

Tabela 11: Correlação linear positiva entre teores de Pb no rejeito piritoso e solo (RPS), sistema radicular e parte aérea de *Pteridium arachnoideum*.

	Pb RPS	Pb sist. radicular	Pb parte aérea
Pb RPS	1		
Pb sist. radicular	0,83	1	
Pb parte aérea	0,64	0,76	1

Fonte: O Autor (2023).

Para teores de Pb no RPS, na parte aérea e no sistema radicular observou-se os coeficientes de variação (CV) 4,81%, 12,76%, e 25,29%, respectivamente.

Os Teores Pb nas áreas A7, A8 e A9 (tabela 12) encontram-se acima do valor de prevenção estabelecido pela resolução CONAMA N° 420/2009 de 72 mg.kg⁻¹ de solo (Anexo 2), e a área A7 também ultrapassa o valor de investigação parasolo agrícola e residencial.

Tabela 12: Teores médios de Pb no RPS, no sistema radicular e parte aérea da *P. arachnoideum* coletada em 9 áreas de mineração de carvão e uma área testemunha (AT2). *Letras minúsculas correspondem a comparação entre áreas para teste Tukey e 5% de significância.

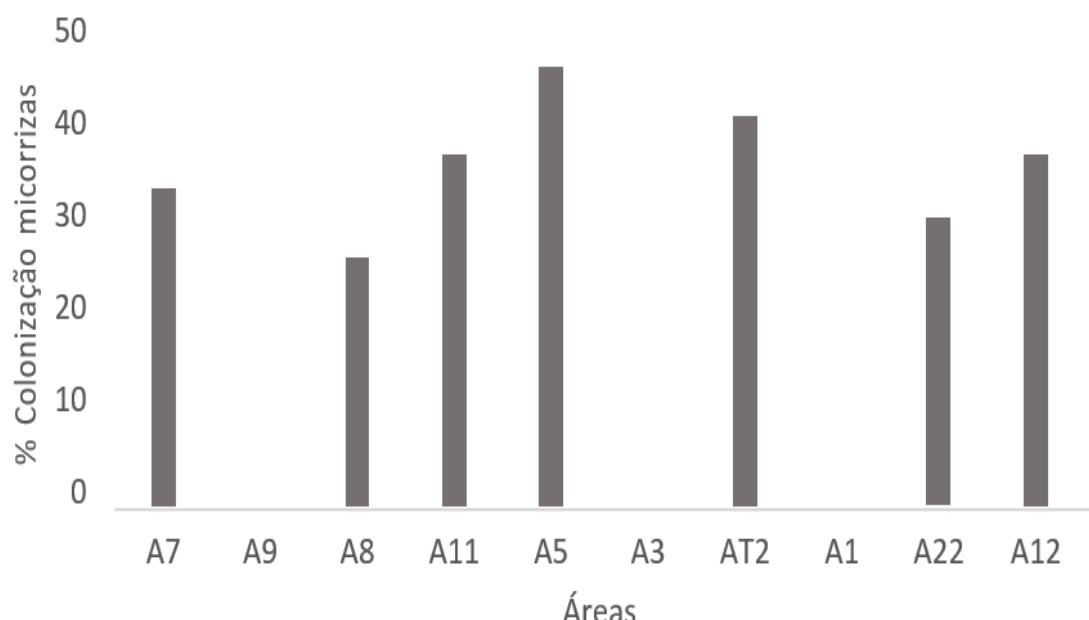
Áreas	Teor RPS	Teor sist. radicular mg. kg ⁻¹	Teor parte aérea
A1	52,81 c	0,41 c	1,00 bcd
A3	55,98 c	0,56 bc	1,96 b
A5	58,28 c	0,50 c	1,41 bc
A7	839,74 a	4,19 a	4,23 a
A8	141,51 b	2,61 a	5,21 a
A9	146,29 b	1,93 ab	1,01 bcd
A11	60,81 c	0,57 bc	0,49 d
A12	6,11 d	0,34 c	0,57 cd
A22	46,15 c	0,59 bc	2,06 b
AT2	55,03 c	0,22 c	0,49 d

Fonte: O Autor (2023).

O teor de Pb encontrado no solo da área testemunha ($55,03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) foi superior ao valor de referência de qualidade Pb, conforme Portaria nº 45/2021 do Instituto do Meio Ambiente (IMA), para SC é igual a $16,08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (IMA, 2021). Para o solo o teor é quase quatro vezes maior do que aquele recomendado pela Portaria.

A figura 4 mostra a colonização de micorrízas nas áreas de estudo da presente pesquisa, onde A5, AT2, A11 e A12 destacam-se com as maiores porcentagens de colonização, com 46,71% para a A5; 41,55% para AT2 e 37,46% para A11 e A12, enquanto as áreas A1, A3 e A9 não apresentam colonização por micorrízas.

Figura 4: Porcentagem de colonização por micorrízas nas raízes das plantas coletadas nas dez áreas da pesquisa.



Fonte: O Autor (2023).

Existir colonização por micorrizas nas plantas coletadas na área A7 indica que a presença de FMA's não está relacionada com os altos teores de Pb no solo (fitotóxicos). A área A7 é um depósito de fino e ultrafino, além de receber efluentes de outras cavas situadas próximas, porém a mesma apresenta um pouco mais de 30% de colonização por micorrízas, demonstrando que os FMA's não foram afetados pela fitotoxicidade na área.

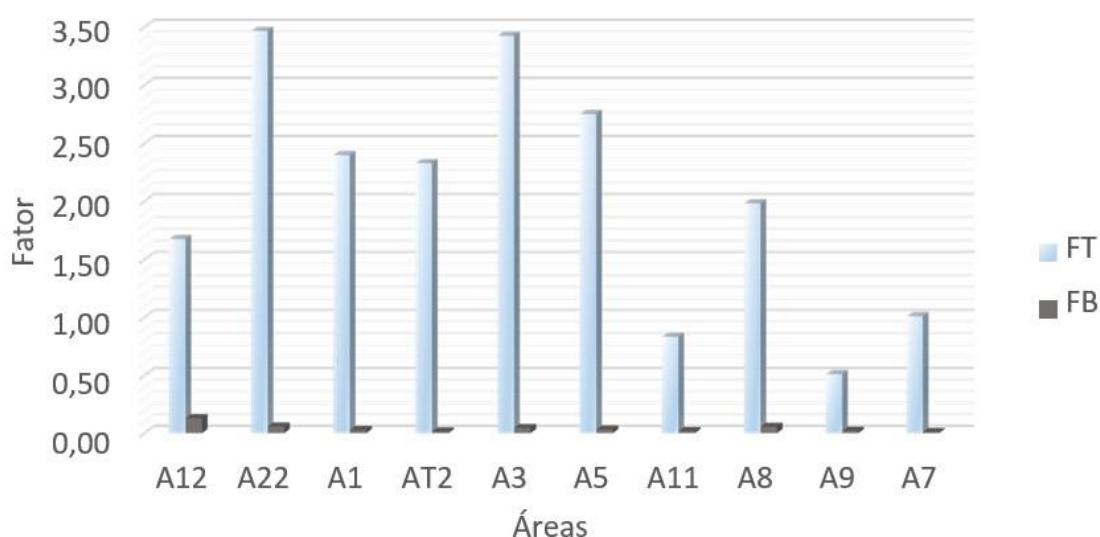
A micorreliação é um tipo de mecanismo que compreende a atuação dos FMA's na proteção das plantas em solos contaminados, sendo objeto de estudo para uso em programas de revegetação de áreas contaminadas por ET's (NOGUEIRA, SOARES, 2010).

Em estudos com FMA's para melhorar o crescimento e acúmulo de As em *P. vittata*, LEUNG et al. (2013) constataram que nas estruturas como hifas e vesículas o As fora depositado principalmente nas células do parênquima do sistema radicular da samambaia, demonstrando que a planta tem, tanto habilidade em acumular As, quanto em reter o ET no acumulador de metal micorrízico.

Para a *P. arachnoideum* na presente pesquisa, as áreas A5, AT2, A11 e A12, destacaram-se em relação a colonização por FMA's. Tais fungos apresentam ocorrência generalizada e formam simbiose importante com diversas plantas, como samambaias por exemplo, podendo desenvolver-se em locais inóspitos por serem organismos que apresentam facilidade adaptativa ao meio (LEUNG et al., 2013).

As áreas A7 e A8 apresentaram os maiores teores de Pb no tecido, parte aérea e sistema radicular, mas não apresentaram os maiores valores de FT e FB (figura 5). Os maiores valores de FT ocorreram nas áreas A22, A3 e A5, as quais apresentaram teores de Pb, no rejeito piritoso, inferiores a $58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Figura 5: Fatores de translocação e bioacumulação em *P. arachnoideum*, presente nas dez áreas da pesquisa.



Fonte: O Autor (2023).

Os altos teores de Pb que ocorrem nas áreas A7, A8 e A9 podem estar associados à geoquímica do mesmo, que é pouco móvel, podendo ser complexado por matéria orgânica, quimissorvido em óxidos de silicato e minerais e precipitado como carbonato, hidróxido ou fosfato, sendo um dos metais tóxicos mais abundantes no carvão (ANDREOLA, 2022). A análise de correlação linear entre teor de Pb no RPS, FT e FB (tabela 14) indica que o aumento do teor de Pb no solo não resulta em aumento nos valores de FT e FB.

Tanto em áreas que apresentam teores menores de Pb, como as áreas A1, A3 e A12, quanto em áreas com altos teores, como A7, A8 e A9, o FB para todas as dez áreas é relativamente baixo, o que demonstra que a *Pteridium arachnoideum* não pode ser considerada uma planta bioacumuladora, pois se fosse, era de se esperar que em áreas com maiores teores de Pb, houvessem maiores valores de FB, como por exemplo nas áreas A7, A8 e A9.

As áreas A9 e A8 apresentam teores de Pb sete vezes inferior a área A7 (tabela 13), mas, os teores no tecido da planta são semelhantes.

Tabela 13: Correlação linear entre teores de Pb no rejeito piritoso e no solo(RPS) versus fator de translocação e RPS versus fator de bioacumulação para *P. arachnoideum*.

Pb RPS	
Pb RPS	1
FT	-0,41
FB	-0,37

Fonte: O Autor (2023).

Quanto maior for o FB, maior será a capacidade da samambaia em transferir determinado elemento-traço presente na solução do solo, consequentemente, maior será a capacidade da planta em remover o elemento do meio ambiente. Nas áreas da pesquisa o FB mais alto, para a *Pteridium arachnoideum*, para Pb, fora na A12, de 14%, porcentual baixo quanto comparado a *Athyrium wardii*, outra espécie de samambaia que, conforme ZHAN et al. (2018) pode apresentar FB de até 78% para Pb. Em relação ao FT seu valor indica a eficiência da *P. arachnoideum* em translocar o Pb presente no sistema radicular para a parte aérea, sendo as áreas A22, A3 e A5, as quais se destacaram em relação ao fator. A *P. arachnoideum* pode ser considerada como fitoestabilizadora.

7. CONCLUSÃO

Os teores de Pb presente no tecido da samabaia *Pteridium arachnoideum* indicam que a planta pode ser considerada fitoestabilizadora pois, as áreas A7, A9 e A8, que apresentaram maiores teores do ET, não foram as mesmas quando analisado, por exemplo, o FT, onde A22, A3 e A5, são as áreas que apresentam maiores valores para o referido fator.

A revisão bibliográfica permitiu analisarmos diversas pesquisas sobre a utilização de samambaias com potencial fitorremediador para áreas degradadas com ET's, encontrando samambaias como a *Pteris vittata* L., *Pteris multifida* e *Athyrium wardii*, que apresentam potencial fitorremediador maior que a *P. arachnoideum*, por conseguirem acumular mais Pb em seu tecido, porém isso não impede seu uso em áreas degradadas pela mineração de carvão.

A presença de Fungos Micorrízicos Arbusculares em algumas áreas do estudo, como as áreas A7 e A8, que mesmo apresentando altos teores de chumbo, não foi limitante para a ocorrência dos FMA's

8. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A *P. arachnoideum* mostra-se tolerante as condições adversas dos locais, apresentando-se como pioneira em estádio primário de sucessão ecológica espontânea, podendo vim a fazer parte de um PRAD, sendo alternativa para áreas atingidas pela mineração de carvão.

A presente pesquisa espera contribuir para desenvolvimento de projetos e planos de recuperações das áreas degradadas pela mineração de carvão na Bacia Carbonífera Catarinense e de outros locais onde a atividade de mineração de carvão estejam ocasionando os mesmos problemas ambientais.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os passivos ambientais gerados na BCC são advindos da formação dos rejeitos e estéreis, que ocasionaram degradações ao meio, atingido solos, águas, vegetação e ao próprio ser humano, principalmente pela geração da DAM, originada quando minerais sulfetados, como por exemplo a pirita (FeS₂), existentes nos depósitos de mineração, são oxidados em presença de água ou oxigênio.

A DAM também é favorecida pelos elevados volumes de chuvas e temperaturas que podem ultrapassar os 30 °C, em determinados meses do ano, na região da BCC, acelerando a drenagem ácida e consequentemente prejudicando o meio. Em contrapartida, algumas espécies de vegetais conseguem sobreviver nestes meios.

Tais espécies, nativas da região e tidas como pioneiros, conseguem se desenvolver no local mesmo com baixa incidência de luz solar direta e solos pouco férteis, características presentes nos depósitos investigados.

A espécie de samambaia *Pteridium arachnoideum*, fora encontrada nos dez depósitos do presente trabalho, o que fortalece a possibilidade desta planta apresentar potencial para utilização em áreas degradadas pela mineração de carvão, a céu aberto, podendo proporcionar a reestruturação natural do local, mas é preciso a realização de trabalhos a campo e em laboratórios para a compreensão de como a *P. arachnoideum* consegue sobreviver em tais condições e analisar a viabilidade de integrá-la a planos de recuperação de áreas degradadas (PRAD).

O presente trabalho espera contribuir para futuros PRAD's, colaborando para recuperação das áreas degradadas pela atividade de mineração de carvão, não somente da BCC, mas de quaisquer outras áreas degradadas pela mineração de carvão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERT, P. R.; PINTO, F. S.; MIGUEL, P.; STUMPF, L.; LEIDEMER, J.D. **Acidification potential of geological materials in a coal mining area in southern Brazil.** Journal of South American Earth Sciences. Volume 120, páginas, 2022.
- ALMEIDA, R.F. DE. **Plantas acumuladoras de metais pesados no solo – uma revisão.** Revista de Biotecnologia e Ciências. Volume 2, 19 páginas, 2012.
- ANDRADE, J.C. DA M.; TAVARES, S.R. DE L.; MAHLER, C.F. **Fitorremediação: O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental.** Oficina de Textos, 176 páginas, volume único, 2007.
- ANDREOLA, A. **Relação entre a presença de samambaias e licófitas e o teor de elementos-traço em áreas degradadas pela mineração de carvão em Santa Catarina, sul do Brasil.** Tese (doutorado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages. 158 páginas, 2015.
- ANDREOLA, A.; ROSINI, D.N.; CAMPOS, M.L.; BIASI, J.P.; ZANETTE, V.C.; BORTOLUZZI, R.L.C.; MIQUELUTTI, D.J.; NICOLEITE, E.R. **Ferns and lycophytes in coal mining waste and tailing landfills.** Environmental Science and Pollution Research. Volume 29, 12 páginas, 2022.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. **Carvão Mineral**, parte III: Fontes Não-Renováveis. Capítulo 9, 13 páginas. 2020.
- ANSARI, A.A.; GILL, S.S.; GILL, R.; LANZA, G.R.; NEWMAN, L. **Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants.** Volume 6, 20 páginas, 2018.
- ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **The priority list of hazardous substances..** Disponível em: < <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/>>. Acesso em 02.02.2023.
- BAJRACHARYA, G.B.; BAJRACHARYA, B. **A comprehensive review on Nepalese wild vegetable food ferns.** Journal Heliyon, V. 8, 59 páginas, 2022.
- BARBOSA, M. V.; PEDROSO, D. D. F.; CURI, N.; CARNEIRO, M. A. C. Diferentes fungos micorrízicos arbusculares afetam a formação e estabilidade de agregados do solo?. Ciência e Agrotecnologia, v. 43, 2019.,
- BIASSI, J.P.; ANDREOLA, A.; CAMPOS, M.L.; SOARES, C.R.F.S.; MEYER, E.; MIYAMOTO, S. **Ocorrência de micorrizas em *Pteridium aquilinum* e *Gleichenia pectinata* coletadas em áreas de bota fora de mineração de carvão em SC.** XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis, SC, 4 páginas, 2013.
- BLANCO, G.D.; CAMPOS, M.L.; DORS, P.; MENEGON, N.H.; HANAZAKI, N. **Is it safe to consume medicinal plants in mined areas?** Acta Botanica Brasilica. Volume 36, 17 páginas, 2022.

BUCH, A.C.; SAUTTER, K. D.; MARQUES, E. D.; SILVA-FILHO, E.V. **Avaliação ecotoxicológica após o rompimento da maior barragem de rejeitos do mundo (barragem de Fundão, Mariana, Brasil): efeitos sobre ácaros oribatídeos.** Ambiente. Geoquímica. Saúde. 10.1007/s10653-020-00593-4. 2020.

BUENO, D. K. **Teores de elementos-traço em solos construídos pós-mineração de carvão no sul de Santa Catarina.** Tese (Doutorado), Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Lages, 65 páginas, 2017.

CAI, S.; HUANG, Y.; CHEN, F.; ZHANG, X.; SESSA, E.; ZHAO, C.; MARCHANT, D.B.; XUE, D.; CHEN, G.; DAI, F.; LEEBENS-MACK, J.H.; ZHANG, G.; SHABALA, S.; CHRISTIE, J.M.; BLATT, M.R.; NEVO, E.; SOLTIS, P.S.; SOLTIS, D.E.; FRANKS, P.J.; WU, F.; CHEN, Z.H. **Evolution of the rapid response to blue light associated with explosive diversification of ferns in angiosperm forests.** New Phytologist Foundation. Volume 230, 13 páginas, 2021.

CÉSAR, R.; ROCHA, B. C. R. C.; CASTILHOS, Z. C.; CAMPOS T. M. P.; SCHNEIDER, C. **Bioensaios com oligoquetas edáficos para avaliação da eficácia do tratamento de resíduos de mineração de carvão em cenário de disposição terrestre.** Revista Geociências, 36, págs. 793 – 800. 2017.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Carvão Nacional: potencial, limitações e perspectivas de aproveitamento.** SIMEXMIN 2014. Seminário “XI – Potencial e Projetos de Minerais Estratégicos e Críticos. 2014.

CHEN, Z.H. **Unveiling novel genes in Fern genomes for the design of stress tolerant crops.** Journal Crop Design. Volume 1, 13 páginas, 2022.

CHOPARD, A.; BENZAAZOUA, M.; BOUZAHZAH, H.; PLANTA, B.; MARION, P. **A contribution to improve the calculation of the acid generating potential of mining wastes.** Chemosphere. Volume 175, 10 páginas, 2017.

CHOWDHURY, S. **11 - Lead-based construction and building materials: human exposure, risk, and risk control.** Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials. Volume único, 16 páginas, 2022.

COLLINS, M.S.; VENKATRAMAN, S.K.; VIJAYAKUMAR, N.; KANIMozhi, V.; ARBAAZ, S.M.; STACEY, R.G.S.; ANUSHA, A.; CHOUDHARY, R.; LVOV, V.; TOVAR, G.I.; SENATOV, F.; KOPPALA, S.; SWAMIAPPAN, S. **Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review.** Journal of Hazardous Materials Advances. Volume 7, 19 páginas, 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N.º 420.** Disponível em http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601 Acesso em 12.11.2022.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M.; NOVAKOSKI, F. P.; RICINI, B. M. **Carvão Mineral.** Revista Agronomia Brasileira, volume 4, 10 páginas. 2020.

- DAI, S.; BECHTEL, A.; EBLE, C. F.; FLORES, R. M.; FRENCH, D.; GRAHAM, I. T.; HOOD, M. M.; HOWER, J. C.; KORASIDIS, V. A.; MOORE, T. A.; PÜTTMANN, W.; WEI, Q.; ZHAO, L.; O'KEEFE, J. M. K. **Recognition of peat depositional environments in coal: A review.** International Journal of Coal Geology. Volume 219, 88 páginas, 2020.
- DANIEL, E. S. **Aplicação de cobre, crescimento, morfogênese e nutrição mineral em gramíneas tropicais.** Tese (Doutorado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 109 páginas, 2018.
- DAY, P.R. **Particle fractionation and particle-size analysis.** In: BLACK, C.A. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, 1: 21 páginas, 1965.
- DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y.; CASTANED, C.; RODRÍGUEZ-OCHOA R.; JIMÉNEZ, J.J. **Assessment of soil fauna footprints at a rehabilitated coal mine using micromorphology and near infrared spectroscopy (NIRS).** Geoderma. Volume 313, 10 páginas, 2018.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Serviço nacional de levantamento e conservação do solo. Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 212 páginas, 1997.
- ENGWA, G.A.; FERDINAND, P.U.; NWALO, F.N.; UNACHUKWU, M.N. **Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans.** Intech Open. Volume, 24 páginas, 2019.
- EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico do Estado de Santa Catarina.** 1.010 páginas, 2022.
- FERREIRA, L. P.; MÜLLER, T. G.; CARGNIN, M.; OLIVEIRA, C. M. DE.; PETERSON, M. **Valorization of waste from coal mining pyrite processing.** Journal of Environmental Chemical Engineering. Volume 9, 2021.
- FERREIRA, R. A.; PEREIRA, M. F.; MAGALHÃES, J. P.; MAURÍCIO, A. M.; CAÇADOR, I.; DIAS, S. M. **Assessing local acid mine drainage impacts on natural regeneration-revegetation of São Domingos mine (Portugal) using a mineralogical, biochemical and textural approach.** Science of The Total Environment. Volume 775, 29 páginas, 2021.
- FILHO, S.F.M.; DE BRITO, G.Q.; MURTA, J.R.M.; SALEMI, L.F. **Invasion in the riparian zone: What is the effect of *Pteridium arachnoideum* on topsoil permeability?** Journal Acta Oecologica. Volume 117, 13 páginas, 2022.
- GAGARIN, H.; SRIDHAR, S.; LANGE, E. U.; BRASILEIRO, M. D. **Considering non-power generation uses of coal in the United States.** Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 124, 17 páginas, 2020.

GALL, E.J.; BOYD, R.S.; RAJAKARUNA, N. **Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review.** Environmental Monitoring and Assessment. Volume 187, 62 páginas, 2015.

GALVAN, N. S.; CAMPOS, M. L.; MIQUELLUTI, D. J.; ESTEVES, M. E. S.; DORS, P. **Plantas medicinais e metais pesados: uma revisão bibliométrica.** Research, Society and Development, v. 11, n. 9, 2022.

GAO, P.; SUN, X.; XIAO, E.; XU, Z.; LI, B.; SUN, W. **Characterization of iron-metabolizing communities in soils contaminated by acid mine drainage from an abandoned coal mine in Southwest China.** Environmental Science and Pollution Research. Volume 26, 14 páginas, 2019.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. **Particle-Size Analysis.** In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, 383-411. 1986.

GIACHINI, A.J.; SULZBACH, T.S.; PINTO, A.L.; ARMAS, R.D.; CORTEZ, D.H.; SILVA, E.P.; BUZANELLO, E.B.; SOARES, A.G.; SOARES, R.F.S.; ROSSI, M.J. **Microbially-enriched poultry litter-derived biochar for the treatment of acid mine drainage.** Archives of microbiology. Volume 200, 10 páginas, 2018.

GIDLOW, D.A. **Lead toxicity.** Occupational medicine Volume 65, 5- Edição, 8 páginas, 2015.

GRIME, J. P.; HODGSON, J. G.; HUNT, R. **Comparative Plant Ecology,** UnwinHyman Ltd, London, UK. (1988).

KAUR, G G.; COUPERTH, S.J.; JONES, B.W.H.; MILLAR, G.J. **Alternative neutralisation materials for acid mine drainage treatment.** Journal of Water Process Engineering. Volume 22, 12 páginas, 2018.

HOJO-SOUZA, N. S.; CARNEIRO, C.M.; SANTOS, R. C. **Pteridium aquilinum: o que sabemos e o que ainda falta saber.** Bioscience Journal. Volume 26, 11 páginas, 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Banco de Dados de Informações Ambientais – BDia. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao> Acesso em: 12/12/2022.

IEA. Agência Internacional de Energia. **Principais estatísticas mundiais de energia 2021.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply> Acesso em 23/11/2022.

IMA – Instituto do Meio Ambiente. **PORTARIA Nº 045/2021.** 16 páginas, disponível em: <https://consultas.ima.sc.gov.br/portarias/pdf/2802> Acesso em 06/02/2023.

JALILIBAL, Z.; AMIRI, A.; CASTAGLIOLA, P.; KHOO, M.B.C. **Monitoring the coefficient of variation: A literature review.** Computers & Industrial Engineering. Volume 161, 39 páginas, 2021.

JATOBA, L.J. **Alelopatia em *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon. (Dennstaedtiaceae).** Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos (SP), 114 páginas, 2016.

JATOBA, L.J.; VARELA, R.M.; MOLINILLO, J.M.G.; DIN, Z.U.; GUALTIERI, S.C.J.; FILHO, E.R.; MACÍAS, F.A. **Alelopatia da samambaia (*Pteridium arachnoideum*): novas evidências de folhas verdes, serapilheira e solo.** Journal Plos One, Volume 11, 11 páginas, 2016.

KADNIKOV, V. V.; GRUZDEV, E. V.; IVASENKO, D. A.; BELETSKY, A.V.; AV MARDANOV, A.V.; DANIOVA, E.V.; KARNACHUK, O.V.; RAVIN, N.V. **Selection of a microbial community in the course of formation of acid mine drainage.** Journal Microbiology. Volume 88, 8 páginas, 2019.

KAWAKAMI, J. **Samambaias e avencas. Manual de Floricultura.** IN: Simpósio Brasileiro de Floricultura e Plantas Ornamentais. Maringá, Paraná, p. 238-239, 1992.

KIJO-KLECKOWSKA, A.; SZUMERA, M.; GNATOWSKI, A.; SADKOWSKI, D. **Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide.** Journal Energy. Volume 258, 32 páginas, 2022.

KUANG, Y.; ZHANG, L.; WU, L.; LIU, X.; WEI, Z.; CHEN, J.; ZHANG, S. **Insight into the separation mechanism of coal macerals by micro characterization and density functional theory calculation.** Journal Fuel. Volume 332, parte I, 19 páginas, 2022.

LEAL-ALVARADO, D.A.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, A.; CALDERÓN-VÁZQUEZ, C.L.; UH-RAMOS, D.; FUENTES, G.; RAMÍREZ-PRADO, J.H.; SÁENZ-CARBONELL, L.; SANTAMARÍA, J.M. **Identification of up-regulated genes from the metal-hyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, in response to lead exposure.** Aquatic Toxicology. Volume 193, 22 páginas, 2017.

LEUNG, H.M.; LEUNG, A.O.W.; YE, Z.H.; CHEUNG, K.C.; YUNG, K.K.L. **Mixed arbuscular mycorrhizal (AM) fungal application to improve growth and arsenic accumulation of *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) grown in As-contaminated soil.** Chemosphere. Volume 92, 8 páginas, 2013.

NOGUEIRA, M.A.; SOARES, C.R.F.S. **Micorrízas arbusculares e elementos-traço.** In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A.; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. Organizadores. **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil.** Lavras: Universidade Federal de Lavras. Páginas 475 – 501. 2010.

- LI, C.; SANCHEZ, G.M.; WU, Z. **Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989-2018) in southern China.** Environment Pollution. Volume 260, 20 páginas, 2020.
- LI, J.; WEI, Y.M.; LIU, L.; LI, X.; YAN, R. **The carbon footprint and cost of coal-based hydrogen production with and without carbon capture and storage technology in China.** Journal of Cleaner Production. Volume 362, 26 páginas, 2022.
- LI, X.; TIAN, J.; JU, Y.; CHEN, Y. **Permeability variations of lignite and bituminous coals under elevated pyrolysis temperatures (35–600 °C): An experimental study.** Journal Energy. Volume 254, 30 páginas, 2022.
- MA, L.Q.; KOMAR, K.M.; TU, C.; ZHANG, W.; CAI, Y.; KENNELLEY, E.D. **A fern that hiperaccumulates arsenic.** Nature, London, volume 409, 579 páginas, 2001.
- MA, Z.; CHENG, L.; WANG, Q.; LI, L.; LUO, G.; ZHANG, W. **Co-combustion characteristics and CO₂ emissions of low-calorific multi-fuels by TG-FTIR Analysis.** Journal Energy. Volume 252, 18 páginas, 2022.
- MAAHS, R.; KUCHLE, J.; SCHERER, C.S.; ALVARENGA, R.S. **Sequence stratigraphy of fluvial to shallow-marine deposits: The case of the early Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, southernmost Brazil.** Brazilian Journal of Geology. Volume 49, 20 páginas, 2019.
- MARRUGO NEGRETE, J.; PINEDO-HERNANDEZ, J.; DIEZ, S. **Avaliação da poluição por metais pesados, distribuição espacial e origem em solos agrícolas ao longo da bacia do rio Sinú, Colômbia.** Ambiente. Res., 154, pp. 380 – 388, 2017.
- MELLO, J.W.V.; DUARTE, H.A.; LADEIRA, A.C.Q. **Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina.** SBQ. Cadernos Temáticos de Química Nova. Número 8, páginas 24-29, 2014.
- MILLIGAN, G.; BOOTH, K.E.; COX, E.S.; PAKEMAN, R.J.; LE DUC M.G.; CONOR, L.; MELRO, S.; MARRS, R.H. **Change to ecosystem properties through changing the dominant species: Impact of Pteridium aquilinum-control and heathland restoration treatments on selected soil properties.** Journal of Environmental Management. Volume 207, 8 páginas, 2018.
- MUDGAL, V.; RANINGA, M.; PATEL, D.; ANKOLIYA, D.; MUDGAL, A. **A review on Phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals.** Journal Materials To Day: Proceedings. Volume 69, páginas, 2022.
- NAKATA, H.; NAKAYAMA, S.M.M.; YABE, J.; MUZANDU, K.; KATABA, A.; IKEDA-ARAKI, A.; DRISSE, E.N.B.; ONYON, G.J.; GORMAN, J.; KRITIKA, P.; FUKUNAGA, H.; IKENAKA, Y.; KISHI, R.; ISHIZUKA, M. **Narrative review of lead poisoning in humans caused by industrial activities and measures compatible with sustainable industrial activities in Republic of Zambia.** Science of The Total Environment. Volume 850, 32 páginas, 2022.

NWACHUKWU, J.I.; CLARKE, L.J.; SYMEONAKIS, E.; BREARLEY, F.Q. **Assessment of human exposure to food crops contaminated with lead and cadmium in Owerri, South-eastern Nigeria.** Journal of Trace Elements and Minerals. Volume 2, 19 páginas, 2022.

OBENG-GYASI, E. **Sources of lead exposure in various countries.** Journal Reviews on Environmental Health. Volume 34, 9 páginas, 2019.

OLEKO, A.; PECHEUX, M.; SAOUDI, A.; ZEGHNOUN, A.; HULIN, M.; BARBIER, M.L.; MENARD, C.; DENYS, S.; FILLOL, C. **Estimation of blood lead levels in the French population using two complementary approaches: Esteban (2014–2016) as part of the human biomonitoring program and the national surveillance system for childhood lead poisoning (2015–2018).** Environmental Research. Volume 213, 23 páginas, 2022.

OLIVEIRA, L.M. **Potencial de samambaias para fitorremediação de arsênio.** Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA), 105 páginas, 2012.

OLIVEIRA, C. M. DE.; MÜLLER, T. G.; FERREIRA, L. P.; CECHINEL, M. A. P.; PETERSON, M.; PEREIRA, F. R. **Valuation of iron pyrite from coal mining in southern Brazil.** Journal of Environmental Chemical Engineering. Volume 7, 2019.

OLIVEIRA, V.M.; SCHWARTSBURD, P.B.; BRIGHENTI, A.M.; D'OLIVEIRA, P.S.; MIRANDA, J.E.C. **PLANTAS TÓXICAS EM PASTAGENS: Samambaia-do-campo (*Pteridium esculentum* subsp. *arachnoideum* (Kaulf.) Thomson, Família Dennstaedtiaceae).** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Juiz de Fora (MG), Comunicado Técnico 84, 21 páginas, 2018.

OMS - Organização Mundial da Saúde. **The impact of chemicals on public health: known and unknown – data addendum for 2019.** Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/342273> Acesso em 07/12/2022.

PAL, N.; SUKUL, S. **Consequences of copper and lead stress on biochemical properties and mitotic chromosomal behavior of two thelypteroid ferns and their potential in tolerance of those metals.** South African Journal of Botany. Volume 147, 9 páginas, 2022.

RAHMAN, F.; SUGAWARA, K.; HUANG, Y.; CHIEN, M.F.; INOUE, C. **Arsenic, lead and cadmium removal potential of *Pteris multifida* from contaminated water and soil.** Quimiosfera. Volume 20, 7 páginas, 2018.

RIBEIRO, J. T. DE M.; FERREIRA, G. C. **Mineração subterrânea de carvão X comunidade no seu entorno: um exemplo de Santa Catarina.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto – MG, pp 459-464, 2007.

R. DEVELOPMENT CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing.** Foundation R for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.

ROCHA-NICOLEITE, E.; CAMPOS, M.L.; COLOMBO, G.T.; OVERBECK, G.E.; MÜLLER, S.C. **Forest restoration after severe degradation by coal mining: lessons from the first years of monitoring.** Brazilian Journal of Botany. Volume 41, 11 páginas, 2018.

SCHWARTSBURD, P. B.; MORAES, P. L. R. DE; LOPES-MATTOS, K. L. B. **Recognition of two morpho-types in eastern South American brackens (Pteridium-Dennstaedtiaceae Polypodiopsida).** Journal Phytotaxa. Volume 170, 14 páginas, 2014.

SCHWARTSBURD, P. B.; YAÑEZ, A; PRADO, J. **Formal recognition of six subordinate taxa within the South American bracken fern, *Pteridium esculentum* (*P. esculentum* subsp. *arachnoideum* s.l. Dennstaedtiaceae), based on morphology and geography.** Journal Phytotaxa. Volume 333, 18 páginas, 2017.

SCHUMANN, W. **Rochas e Minerais.** Tradução: Rui Franco Ribeiro e Mario Del Rey. Editora: Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro/RJ, 1985.

SCOPUS. **Scopus® Quick reference guide.** ELSEVIER, 9 páginas, 2017.

SDM – Diagnóstico das Bacias do Estado de Santa Catarina. Disponível em http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/biblioteca_visualizar_arquivos.jsp?idEmpresa=1&idPasta=182 Acesso em 12/12/2022.

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. **Boletim do Setor Mineral**, 7- Edição. 13 páginas. 2021. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2022/03/Boletim_SGM_Dez2021_digital_7-edic%CC%A7a%CC%83o.pdf. Acesso em 21/11/2022.

SGB. SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO. **Recuperação de Áreas Degradadas por Carvão na Bacia Carbonífera de Santa Catarina.** Disponível em: <http://webserver1.cprm.gov.br/GestaoTerritorial/Acoes-Especiais/Recuperacao-de-Areas-Degradadas-CBB-SantaCatarina-5402.html> Acesso em 22/11/2022.

SILVA, L. M. DA.; FERREIRA, R. L. **Environmental Impact Caused by Coal Mining in The South of Santa Catarina State.** Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade, v.6 n.4 – 2015.

SINGH, A. K.; SINGH, U. A.; PANIGRAHI, D. C.; SINGH, J. **Updated greenhouse gas inventory estimates for Indian underground coal mining based on 2019 IPCC refinements.** Journal IScience. Volume 25, Issue 9, 2022.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis.** London, Academic. 769 páginas, volume único, 2010.

- SONG, Y.; HOU, D.; ZHANG, J.; O'CONNOR, D.; LI, G.; GU, Q.; LI, S.; LIU, P. **Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China.** *Science of The Total Environment.* Volume 610, 10 páginas, 2018.
- SOUZA JUNIOR, T.F.; MOREIRA E.B.; HEINECK K.S. **Mining tailings dams in Brazil.** *HOLOS* 34, Volume 5, 39 páginas, 2018.
- STUMPF, L.; PINTO, M. A. B; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; JUNIOR, L. A.D. **Recuperação de solos degradados por mineração de carvão: indicadores de qualidade e espécies vegetais.** *Agrária, Recife.* Volume 11, 17páginas, 2016.
- SUN, Z.; XIE, X.; WANG, P.; HU, Y.; CHENG, H. **Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: a case study of a polymetallic mine in southern China.** *Science of the Total Environment.* Volume, 11 páginas, 2018.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2.edição, Porto Alegre, Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (Boletim Técnico de Solos, 5), 174 páginas, 1995.
- THAKUR, C.; RAJBHANDARY, S. **Ferns and allied ferns from Panchase protected forest, central Nepal.** *Journal of Plant Resources.* Volume 16, 6 páginas, 2018.
- THOMSON, J. A. **Taxonomic status of diploid southern hemisphere brackens (Pteridium: Dennstaedtiaceae).** *Telopea.* Volume 14, 6 páginas, 2012.
- TRIPATHY, D. P.; ALA, C. K. **Identification of safety hazards in Indian underground coal mines.** *Journal of Sustainable Mining.* Volume 17, 8 páginas. 2018.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Technical document of acid mine drainage prediction.** Office of Solid Waste, Washington, USA; 48 páginas, 1994.
- VISENTIN, C.; TRENTIN, A. W. S.; BRAUN, A. B.; THOMÉ, A. **Application of life cycle assessment as a tool for evaluating the sustainability of contaminated sites remediation: A systematic and bibliographic analysis.** *Science of The Total Environment*, v. 672, p. 893-905, 2019.
- VO, T. L.; NASH, W.; GALDO, M. D.; REZANIA, M.; RICH, C.; NEZHAD, M. M.; FERRARA, L. **Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives.** *Journal of Cleaner Production.* Volume 336, 40 páginas, 2022.

WALKLEY, A.J.; BLACK, I.A. **Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method.** Soil Sci. Volume 37, 10 páginas, 1934.

WANG, Z.; LECHNER, A. M.; YANG, Y.; BAUMGARTL, T.; WU, J. **Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services.** Science of the Total Environment. 15 páginas, 2020.

WANG, X.; ZHANG, D.; GENG, J.; JIN, Z.; WANG, C.; REN, K. **Effects of CO₂ intrusion on pore structure characteristics of mineral-bearing coal: Implication for CO₂ injection pressure.** Journal of Natural Gas Science and Engineering. Volume 108, 24 páginas. 2022.

WANG, Z.; LUO, K.; ZHAO, Y.; LECHNER, A. M.; WU, J.; ZHU, Q.; SHA, W.; WANG, Y. **Modelling regional ecological security pattern and restoration priorities after long-term intensive open-pit coal mining.** Journal Science of the Total Environment. 13 páginas, 2022.

WANI, A.L.; ARA, A.; USMANI, J.A. **Lead toxicity: a review.** Interdisciplinary toxicology. Volume único, 10 páginas, 2015.

XIN, R.; BANDA, J. F.; HAO, C.; DONG, H.; PEI, L.; GUO, D.; WEI, P.; DU, Z.; XIONG, Y.; NING, Z.; LIU, Y.; GOMEZ, M.; XIAO, T. **Emission and transformation behaviors of trace elements during combustion of Cd-rich coals from coal combustion related endemic fluorosis areas of Southwest, China.** Journal Ecotoxicology and Environmental Safety. Volume 246, páginas, 2022.

YADAV, K.K.; GUPTA, N.; KUMAR, A.; REECE, L.M.; SINGH, N.; REZANIA, S.; KHAN, S.A. **Mechanistic understanding and holistic approach to phytoremediation: A review on application and future prospects.** Journal Ecological Engineering. Volume 120, 62 páginas, 2018.

YAN, A.; WANG, Y.; TAN, S.N.; YUSOF, M.L.M.; GHOSH, S.; CHEN, Z. **Phytoremediation: a promising approach for revegetation of land polluted by heavy metals.** Frontiers in Plant Science. Volume 11, 15 páginas, 2020.

ZHAN, J.; LI, T.; YU, H.; ZHANG, X. **Cd and Pb accumulation characteristics of phytostabilizer *Athyrium wardii* (Hook.) grown in soils contaminated with Cd and Pb.** Environmental Science and Pollution Research. Volume 25, 11 páginas, 2018.

ZHANG, Y.; DONG, H. **Contrasting seasonal variations of geochemistry and microbial community in two adjacent acid mine drainage lakes in Anhui Province, China.** Environmental Pollution. Volume 268, 18 páginas, 2021.

ZHU, X.; LI, J.; CHENG, H.; ZHENG, L.; HUANG, W.; YAN, Y.; LIU, H.; YANG, X. **Assessing the impacts of ecological governance on carbon storage in an urban coal mining subsidence area.** Journal Ecological Informatics. Volume 72. 2022.

ANEXO 1

Links para acesso as legislações

<http://acpcarvao.com.br/login/index.acaocivilpublica>

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3353.htm

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L1886.htm

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3860.htm

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del0227.htm

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6567.htm

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Atos/decretos/1980/D85206.html

<https://leisestaduais.com.br/sc/lei-ordinaria-n-2858-1961>

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d97632.html

https://www.suape.pe.gov.br/publicacoes/resolucao/_CONAMA_008_1990

<https://leismunicipais.com.br/a/sc/g/grao-para/lei-ordinaria/2011/181/1804>

http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2007/13972_2007_Lei.html

<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.299-de-5-de-janeiro-de-2022>

<https://Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos>

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13575.htm

<https://www.congressonacional.leg.br/medidas-provisorias/-/mpv/154474>

ANEXO 2

Lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas, obtidos da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente Nº 420, de 28/12/2009.

Substâncias	CAS nº	Solo (mg.kg-1 de peso seco) (1)					Água Subterrânea (µg.L-1)	
		Referência de qualidade	Prevenção	Investigação				
				Agrícola APMax	Residencial	Industrial		
Inorgânicos								
Alumínio	7429-90-5	E	-	-	-	-	3.500**	
Antimônio	7440-36-0	E	2	5	10	25	5*	
Arsênio	7440-38-2	E	15	35	55	150	10*	
Bário	7440-39-3	E	150	300	500	750	700*	
Boro	7440-42-8	E	-	-	-	-	500	
Cádmio	7440-48-4	E	1,3	3	8	20	5*	
Chumbo	7440-43-9	E	72	180	300	900	10*	
Cobalto	7439-92-1	E	25	35	65	90	70	
Cobre	7440-50-8	E	60	200	400	600	2.000*	
Cromo	7440-47-3	E	75	150	300	400	50*	
Ferro	7439-89-6	E	-	-	-	-	2.450**	
Manganês	7439-96-5	E	-	-	-	-	400**	
Mercúrio	7439-97-6	E	0,5	12	36	70	1*	
Molibdênio	7439-98-7	E	30	50	100	120	70	
Níquel	7440-02-0	E	30	70	100	130	20	
Nitrato (como N)	797-55-08	E	-	-	-	-	10.000*	
Prata	7440-22-4	E	2	25	50	100	50	
Selênio	7782-49-2	E	5	-	-	-	10*	
Vanádio	7440-62-2	E	-	-	-	1000	-	
Zinco	7440-66-6	E	300	450	1.000	2.000	1.050**	