

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Victória Cardoso de Oliveira**

**Monitoramento de poluição atmosférica através de método biológico com  
utilização de líquens, no município de Caçapava do Sul (RS)**

**Caçapava do Sul  
2024**

**Victória Cardoso de Oliveira**

**Monitoramento de poluição atmosférica através de método biológico com utilização de líquens, no município de Caçapava do Sul (RS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Thiago Henrique Lugokenski

**Caçapava do Sul  
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

O46m Oliveira, Victória Cardoso  
Monitoramento de poluição atmosférica através de método  
biológico com utilização de líquens, no município de Caçapava  
do Sul (RS) / Victória Cardoso Oliveira.  
47 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 2024.  
"Orientação: Thiago Henrique Lugokesnki".  
  
1. monitoramento da qualidade do ar. 2. bioindicadores. 3.  
líquens. I. Título.

**VICTORIA CARDOSO DE OLIVEIRA**

**MONITORAMENTO DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO BIOLÓGICO  
COM A UTILIZAÇÃO DE LIQUENS NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Ambiental e Sanitária da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito  
parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental e  
Sanitária.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Thiago Henrique Lugokenski  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Profª. Dra. Quélen de Lima Barcelos  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Antônio Carlos da Silva  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **ANTONIO CARLOS DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **THIAGO HENRIQUE LUGOKENSKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **QUELEN DE LIMA BARCELOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2024, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1631812** e o código CRC **854D86B7**.

---

Dedico este trabalho às minhas flores (in memoriam - mãe e avó Cecília), minha avó Tania, meu avô Eloi e minha tia Katlen.

## AGRADECIMENTO

Impossível iniciar este agradecimento sem ser direcionado a Deus. Agradeço todos os dias pela força e resiliência que Ele me proporcionou no último ano para que eu pudesse estar aqui hoje, bem e viva. Com certeza, graças a Ele, pude enxergar com mais clareza minha força e minhas qualidades para que pudesse me dedicar nesta trajetória e chegar até aqui.

Agradeço a minha tia Katlen, mulher que me deu apoio e foi para mim uma mãe. Mesmo sem conhecimento e nem experiência, abraçou este papel na minha vida e o cumpriu com maestria. Espero que saiba que me espelho em você para ser melhor. Grata a minha avó Tania e meu avô Eloi, que sempre estiveram ao meu lado independente da adversidade que ocorria. Saiba que minha força de vontade foi fortalecida pelo amor de vocês.

Meu parceiro, Danilo, que é uma peça fundamental na minha vida e que trás conforto familiar mesmo quando estou longe de casa. Saiba que você é importante e que farei o possível para que se sinta desta forma. Minha melhor amiga, Gabrieli, merece mais do que um agradecimento. Me aconselhou nos momentos difíceis e nos fáceis, me motivou quando tudo que eu queria era desistir, puxou minha orelha quando precisei colocar os pés no chão e o mais importante: nunca saiu do meu lado. Todos vocês me mantiveram em pé, quando eu nem imaginava que poderia conseguir seguir em frente e chegar até aqui.

E por fim, mas não menos importante, grata ao meu orientador Thiago Lugokenski, pelo incentivo e pela parceria que me fizeram dia após dia saber que independente do resultado aqui estaria entregue o meu melhor. Espero que tenha atingido as expectativas.

“O insucesso é apenas uma oportunidade  
para recomeçar com mais inteligência”.

Henry Ford

## RESUMO

Devido ao agravamento da poluição atmosférica e o conseqüente declínio da qualidade do ar, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos de monitoramento que sejam práticos, acessíveis e rápidos, especialmente em locais sujeitos a potenciais fontes de contaminação, como áreas de mineração e urbanas. Dentre as abordagens de monitoramento, destaca-se o uso de bioindicadores, como os líquens, que possuem alta sensibilidade a diversos poluentes tóxicos. O biomonitoramento com líquens apresenta vantagens como custo relativamente baixo, eficiência em pesquisas realizadas em grandes áreas e capacidade de diagnóstico de poluentes em baixas concentrações. A mineração, como a de calcário, contribui para a contaminação atmosférica por meio da liberação de partículas finas e emissões de dióxido de enxofre durante o processo de extração, sendo os líquens ferramentas eficazes para monitorar tais impactos. Desse modo, o objetivo foi utilizar a diversidade de espécie dos líquens como bioindicador da qualidade do ar no município de Caçapava do Sul. O monitoramento foi realizado em oito pontos, abrangendo áreas próximas à mineração e pontos de controle no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. A análise quali-quantitativa incluiu a biodiversidade líquênica e a área ocupada por espécies, medida com reticulum e software de contagem de pixels, permitindo o cálculo do Índice de Pureza do Ar (IPA) e da ocupação líquênica (%), em relação às fontes de poluição. Os resultados evidenciaram que os pontos próximos à mineração apresentaram predominância de gêneros crostosos, como *Cryptothecia sp.*, que são mais resistentes à poluição, refletindo a severa contaminação ambiental associada aos baixos valores de IPA (0,83) e ocupação líquênica (1,62%). Já nos pontos mais distantes (13.200 m), observou-se uma maior diversidade de gêneros foliosos e fruticosos, como *Parmotrema sp.* e *Coccocarpia sp.*, associados a condições ambientais mais preservadas, com IPA de 15,78 e ocupação líquênica de 31,73%. A correlação linear de Pearson mostrou uma relação positiva muito forte entre a distância e os indicadores ambientais ( $r=0,98$  para IPA e  $r=0,95$  para ocupação líquênica), confirmando que o impacto ambiental diminui significativamente com o aumento da distância da fonte emissora.

**Palavras chave: bioindicador, poluição atmosférica, líquens.**



## ABSTRACT

The worsening of atmospheric pollution and the consequent decline in air quality necessitate the development of practical, accessible, and rapid monitoring methods, particularly in areas prone to potential contamination sources such as mining and urban environments. Among these approaches, bioindicators like lichens stand out due to their high sensitivity to various toxic pollutants. Lichen biomonitoring offers advantages such as relatively low cost, efficiency in large-scale research, and the ability to detect pollutants at low concentrations. Mining activities, such as limestone extraction, contribute to atmospheric contamination through the release of fine particles and sulfur dioxide emissions, making lichens effective tools for monitoring such impacts. This study aimed to use lichen species diversity as a bioindicator of air quality in the municipality of Caçapava do Sul, Brazil. Monitoring was conducted at eight points, encompassing areas near mining activities and control points in the Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. The qualitative-quantitative analysis included lichen biodiversity and the occupied area of species, measured using a reticulum and pixel-counting software. These methods enabled the calculation of the Air Purity Index (IPA) and lichen coverage (%) concerning pollution sources. The results revealed that sites near mining areas exhibited a predominance of crustose genera, such as *Cryptothecia sp.*, which are more resistant to pollution, reflecting severe environmental contamination associated with low IPA values (0.83) and lichen coverage (1.62%). Conversely, the most distant sites (13,200 m) showed greater diversity of foliose and fruticose genera, such as *Parmotrema sp.* and *Coccocarpia sp.*, corresponding to more preserved environmental conditions, with IPA values of 15.78 and lichen coverage of 31.73%. Pearson's linear correlation indicated a very strong positive relationship between distance and environmental indicators ( $r=0.98$  for IPA and  $r=0.95$  for lichen coverage), demonstrating that environmental impact significantly decreases with increasing distance from the emission source. These results underscore the effectiveness of lichens as bioindicators and contribute to understanding the impacts of mining activities on air quality and lichen biodiversity.

**Keywords: bioindicator, air pollution, lichens.**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação da qualidade do ar em relação ao IPA.....	27
<b>Tabela 2</b> - Distância dos pontos amostrados em relação à área mineradora.....	29

## **LISTA DE SIGLAS**

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DAP - Diâmetro A Altura Do Peito

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPA - Índice de Pureza do Ar

PIB - Produto Interno Bruto

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

PC1 - Ponto Controle 1

PC2 - Ponto Controle 2

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Associação de um micobionte a um fotobionte.....	22
<b>Figura 2</b> - Estrutura e órgãos especializados em líquens.....	22
<b>Figura 3</b> - Líquen crostoso encontrado na área da UNIPAMPA.....	24
<b>Figura 4</b> - Líquen folioso encontrado na área da UNIPAMPA.....	25
<b>Figura 5</b> - Líquen fruticoso encontrado na área da UNIPAMPA.....	25
<b>Figura 6</b> - Mapas de localização.....	29
<b>Figura 7</b> - Reticulum: a. ilustração do reticulum posicionado sobre o caule do forófito; b. reticulum posicionado em um dos forófitos em campo.....	31
<b>Figura 8</b> - Frequência dos líquens dentro da área do reticulum com finalidade de contagem.....	31
<b>Figura 9</b> - Espécies fotografadas em lupa de aumento.....	32
<b>Figura 10</b> - Resumo quantitativo dos dados de amostragem de líquens.....	33
<b>Figura 11</b> - Porcentagem por gênero de líquen identificado.....	34
<b>Figura 12</b> - Diversidade de gêneros liquênicos por ponto de coleta .....	35
<b>Figura 13</b> - Identificação por estrutura morfológica das amostras .....	36
<b>Figura 14</b> - Identificação de estrutura morfológica por ponto de amostragem.....	37
<b>Figura 15</b> - Índice de Pureza do Ar (IPA) por ponto amostrado.....	38
<b>Figura 16</b> - Ocupação Liquênica (%) por ponto amostrado.....	39
<b>Figura 17</b> - Ocupação Liquênica (%) e Índice de Pureza do Ar por ponto amostrado.....	41
<b>Figura 18</b> - Gráficos de correlação linear: a. Correlação entre distância e IPA; b. Correlação entre distância e área ocupada.....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA</b>	<b>16</b>
<b>3 OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Objetivo geral</b>	<b>18</b>
<b>3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>18</b>
<b>4 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>19</b>
<b>4.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA</b>	<b>19</b>
<b>4.2 ATIVIDADE MINERADORA</b>	<b>19</b>
<b>4.3 LÍQUENS</b>	<b>20</b>
<b>4.4 Bioindicadores</b>	<b>23</b>
<b>4.5 QUALIDADE DO AR E ÍNDICE DE PUREZA ATMOSFÉRICA (IPA)</b>	<b>26</b>
<b>5 METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
<b>5.1 ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>28</b>
<b>5.2 AMOSTRAGEM E COLETA DE DADOS</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Análise dos dados</b>	<b>32</b>
<b>6 RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>6.1 Identificação de gênero das amostras</b>	<b>33</b>
<b>6.2 Índice de Pureza do Ar (IPA)</b>	<b>37</b>
<b>6.3 Quantificação da área ocupada</b>	<b>39</b>
<b>6.4 Correlação entre os dados</b>	<b>40</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O agravamento da poluição atmosférica a partir da revolução industrial, não transformou somente o setor industrial e o econômico, como gerou uma nova relação entre o homem e a natureza. César et al. (2013) afirmam que a revolução industrial é a grande responsável pela poluição do ar, pois a partir dela, as produções e os parques industriais se intensificaram. O crescimento desenfreado de cidades e o aumento de indústrias, fizeram com que a poluição atmosférica começasse a ser considerada como uma questão de saúde pública. De acordo com Oliveira & Beretta (2014), discutir sobre poluição atmosférica é essencial, pois está relacionada à interação de ecossistemas com a qualidade da saúde da população.

Na década de 80, a principal fonte de emissão de gases no Brasil eram as indústrias, já na década de 90, a maior parte da emissão de gases era gerada pelos veículos automotores (Toledo & Nardocci, 2011). Esta pode ser originada também por fontes naturais como queima acidental de biomassa e erupções vulcânicas (Cançado et al., 2006). A queima de combustíveis fósseis em motores, bem como a combustão e a expansão das indústrias siderúrgicas, também contribuem para o aumento da emissão de gases na atmosfera. Em concordância com a problemática abordada, destaca-se a atividade mineradora como uma das principais contribuintes para a poluição atmosférica nas áreas afetadas. Ao longo de sua operação, as minas podem causar um agravamento significativo do problema se não aplicarem medidas de remediação, recuperação e restauração.

Tanto as atividades mineradoras quanto as indústrias emitem uma variedade de poluentes atmosféricos, incluindo óxidos de carbono (CO e CO<sub>2</sub>), hidrocarbonetos (HC), Poluentes Orgânicos Persistentes, óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e material particulado (Fellenberg, 2001). É importante ressaltar que o material particulado, presente em todas as atividades mineradoras, apresenta um alto potencial de poluição. Sua presença no ar representa um risco significativo para a qualidade do ar nas regiões afetadas pela atividade mineradora. O acúmulo desses poluentes ao longo do tempo pode ter impactos negativos na saúde humana (Cançado et al., 2006), na biodiversidade e nos ecossistemas locais (Coppins, 1973). Portanto, a análise e monitoramento da poluição atmosférica proveniente das atividades mineradoras são de extrema importância para compreender e mitigar seus efeitos negativos.

Tendo em vista, o potencial poluidor, se faz cada vez mais necessário que se adote medidas de controle e monitoramento da poluição atmosférica em áreas próximas de atividades que são potencialmente nocivas ao ambiente, como a mineração. Nos últimos anos, pode-se afirmar que os estudos envolvendo o emprego de métodos físicos, biológicos ou químicos para esse monitoramento vem crescendo. Entre os métodos biológicos, temos os organismos chamados de líquens, que possuem alta sensibilidade aos poluentes. O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) em altas concentrações no ar, podem ter efeitos negativos nos líquens, levando a danos ou morte das colônias, assim como o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) (Geebelen et. al., 2001). O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), embora não seja um poluente em si, pode desfavorecer espécies mais sensíveis, devido ao aumento de concentrações na atmosfera devido às emissões de combustíveis fósseis (Palmqvist, 1993). Os líquens também podem acumular metais pesados como chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd) e outros. Esses metais são tóxicos para os organismos e podem levar a danos ou morte dos líquens expostos a altas concentrações (Conti et al., 2016).

Os líquens são organismos que vêm sendo utilizados desde o século 19 como bioindicadores e são peça-chave de estudos voltados para o controle das mudanças atmosféricas em diversos locais (Coppins et al., 1993). Como os líquens não possuem raízes fixadas ao forófito, eles acabam dependendo totalmente da absorção de nutrientes e gases presentes no ar para que possam sobreviver. Essa característica o torna vulnerável a absorção de substâncias que não são desejadas por eles, como por exemplo: dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, metais pesados, compostos orgânicos voláteis e etc. Essa absorção pode alterá-lo morfológicamente na sua forma, tamanho e em alguns casos até mesmo na coloração. Além disso, os contaminantes podem afetar a atividade fotossintética das algas ou cianobactérias presentes no líquen, comprometendo a produção de nutrientes essenciais para o seu crescimento e desenvolvimento. No Brasil, diversos estudos foram conduzidos utilizando líquens como bioindicadores atmosféricos, destacando sua sensibilidade a poluentes tóxicos e sua eficácia no monitoramento ambiental (Ferreira, 2008; Martins et al., 2008; Käffer et al., 2011; Meneguini et al., 2012; Santos et al., 2018; Vargas et al., 2023; Martins et al., 2014). Esses organismos são classificados como uma associação simbiótica, que une um componente fúngico a algas ou cianobactérias. O elemento fúngico, denominado micobionte, estabelece uma relação mutualística com o elemento fotossintetizante,

conhecido como fotobionte (Raven et al., 2007). Estudos como o de Vargas et al. (2023), enfatizam que líquens possuem alta capacidade de bioacumulação e são eficazes em detectar poluentes em baixas concentrações. Martins et al. (2014) reforçam a utilização dos líquens como bioindicadores em áreas industriais e urbanas no Brasil, demonstrando sua aplicabilidade no monitoramento da qualidade do ar.

Podemos subdividir os líquens em caracterização por sua estrutura morfológica em hábitos, sendo eles: crostosos, foliosos, filamentosos, esquamulosos e fruticosos (Hawksworth et. al., 1995). Os crostosos possuem uma estrutura que adere totalmente ao substrato, isso pois ela é carecida de córtex inferior. Isso torna sua coleta mais difícil se comparada aos outros hábitos, pois está grudado ao substrato. Os foliosos possuem uma estrutura laminar dorsiventral e normalmente possuem saliências no seu córtex inferior que lembram pequenas folhas. Os filamentosos são extremamente parecidos com fios muito finos e seu talo possui textura aveludada. Os esquamulosos, possuem talo com formação similar a escamas. Por fim, os fruticosos possuem ramos e sua estrutura laminar se parece com arbustos crescendo. Neste trabalho iremos se ater aos três tipos mais frequentemente encontrados, são eles: crostosos, foliosos e fruticosos.

Assim sendo, uma vez que a alta exposição e absorção destes poluentes na atmosfera pode levar o líquen a ter danos ou morte, a quantificação e distribuição dos líquens em determinada área é um fator chave na avaliação dos impactos ambientais desta. E desta forma, o monitoramento da qualidade do ar através do método biológico dos líquens se faz viável para que possamos estimar os riscos ambientais atrelados à questão e que podem vir a afetar populações que vivem nas áreas de risco.

## **2 JUSTIFICATIVA**

São muitos os impactos ambientais que podem ser causados pela mineração, atividade econômica e industrial que consiste na pesquisa, exploração, extração e beneficiamento de minérios presentes em depósitos no subsolo. Em decorrência do crescimento e do interesse pelas atividades de mineração nas últimas décadas se faz necessário a realização de estudo referente aos impactos ao meio ambiente que podem ser ocasionados pela mesma, prezando para que esta atividade seja

realizada com respeito ao meio ambiente natural, preservando-o para esta e para as futuras gerações de modo a garantir um avanço sustentável.

De acordo com a Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), o impacto ambiental é definido no artigo 1º da Resolução Conama-001 como:

“[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam o bem-estar e a saúde da população; as atividades socioeconômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.”

Os principais impactos ambientais que são provocados pela extração do minério afluem ao solo, ao ar e às águas superficiais e subterrâneas. Neste estudo iremos abordar os impactos causados no ar, onde a contaminação ocorre frequentemente através da emissão de material particulado produzido por obra da detonação das rochas, movimentação de máquinas ou até mesmo a ação dos ventos nas frentes de lavra.

O setor de mineração é um fator decisivo na economia do município de Caçapava do Sul, tendo sua exploração focada em calcário. Importante ressaltar que o município é responsável por cerca de 85% da produção de calcário no Estado do Rio Grande do Sul (PMSB, 2013). Esse setor, tem crescimento exponencial, por esse motivo deve ter um plano de ação bem estruturado para que possa visar a recuperação das áreas em que atua. Este estudo pode ser utilizado como referência para futuras pesquisas científicas e também como uma forma de conscientizar as empresas de mineração de calcário sobre a importância de mensurar os seus impactos ambientais, neste caso, a poluição atmosférica.

Em consonância, podemos afirmar que a pesquisa e a criação de parâmetros de biomonitoramento são de extrema importância para o desenvolvimento sustentável. Ao estabelecer parâmetros locais, é possível monitorar a saúde ambiental com maior precisão e identificar alterações ou impactos causados por atividades humanas. Esses parâmetros tornam-se ferramentas essenciais não apenas para mensurar os efeitos de atividades econômicas sobre o meio ambiente, mas também para orientar ações corretivas e preventivas.

Nesse contexto, os líquens destacam-se como instrumentos biológicos fundamentais para investigar, mensurar e quantificar a poluição atmosférica, especialmente em áreas próximas a atividades industriais. Sua sensibilidade às

mudanças ambientais permite a detecção precoce de impactos, contribuindo para uma gestão ambiental mais eficiente.

Além disso, é crucial abordar a conscientização das empresas sobre a relevância do biomonitoramento, incentivando sua colaboração ativa nesse processo. As empresas podem desempenhar um papel estratégico ao integrar práticas sustentáveis em suas operações, utilizando os dados gerados pelo biomonitoramento para ajustar processos, mitigar impactos e atender às legislações ambientais. A parceria entre instituições acadêmicas, órgãos reguladores e empresas pode ser muito benéfica, onde todos os envolvidos compartilhem responsabilidades e resultados, promovendo a preservação ambiental e, ao mesmo tempo, o desenvolvimento econômico sustentável.

Ao ter as empresas como aliadas na implementação de medidas baseadas nos parâmetros de biomonitoramento, é possível alcançar soluções que beneficiem tanto o meio ambiente quanto a sociedade, consolidando práticas de sustentabilidade e proteção ambiental.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal utilizar a diversidade de espécie dos líquens como bioindicador da qualidade do ar no município de Caçapava do Sul (RS).

#### **3.1 Objetivos específicos**

- a) Levantamento da biodiversidade de espécies liquênicas em áreas do município de Caçapava do Sul (RS);
- b) Quantificação da área de ocupação dos líquens nos troncos das árvores dos locais selecionados;
- c) Quantificação do Índice de Pureza do Ar (IPA) nos pontos pré-determinados;
- d) Identificação das espécies liquênicas e suas estruturas morfológicas.

e) Análise de correlação entre a diversidade e ocupação líquênica com a proximidade de atividade mineradora.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Poluição Atmosférica**

De acordo com Drumm et al. (2014), a poluição atmosférica é caracterizada como a existência na atmosfera de substâncias, em porção com capacidade de modificar a composição natural e prejudicar o equilíbrio ambiental. Essa alteração pode ocasionar impactos ao meio ambiente (afetando animais, vida vegetal e saúde pública).

Pode-se citar que os poluentes que ocasionam maiores efeitos, tanto na fauna e flora quanto no meio físico, poluentes atmosféricos perigosos (PAPs), chumbo (Pb), o monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), oxidantes fotoquímicos e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos e material particulado (Martins et al., 2008). Dentre as alterações ocasionadas com maior frequência ao meio ambiente e à saúde humana pelos poluentes atmosféricos destaca-se: acidificação de rios e florestas, o crescimento de problemas respiratórios e circulatórios, diminuição do bem-estar da população, assim como o efeito estufa e aquecimento global (Drumm et al., 2014).

No ano de 2010, um levantamento revelou que a poluição do ar ocasionou cerca de 3,1 milhões de mortes no mundo. É imprescindível afirmar que a poluição atmosférica é um ponto significativo na causa e no agravamento de doenças respiratórias (ex: asma, doença pulmonar obstrutiva crônica, cancro do pulmão) (Mendes et al., 2017) interferindo diretamente na qualidade de vida e na biodiversidade do meio ambiente.

### **4.2 Atividade Mineradora**

A partir do início do século XXI, a indústria de mineração e exploração mineral tem experimentado um crescimento significativo impulsionado por altos investimentos (Araújo et al., 2014). O aumento populacional em consonância com o desenvolvimento tecnológico incitou a procura por recursos minerais e isso fez com que fossem evidenciadas novas jazidas. Atualmente, a atividade mineradora tem

sido base fortalecedora da economia para diferentes nações, isso pois além de produzir empregos, é uma das principais fontes de riqueza existentes hoje. É uma dos pilares do PIB nacional, estima-se que em 2015 a produção mineral chegou próximo do valor de US \$38 bilhões (IBRAM, 2015). Essa atividade inclui a exploração das minas (subterrâneas, de superfície, os poços e/ou pedreiras). Entretanto, apesar do seu papel fundamental no setor econômico, a disponibilidade mineral é finita, essa atividade tende a acabar e desta permanecerão inúmeros impactos ambientais necessitados de medidas mitigadoras de alto nível ou até mesmo impossíveis de reverterem (Silva e Andrade, 2017). Araújo et al. (2014) afirma, sobre os impactos causados de forma geral:

“A mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora. Afeta, também, o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno.”

A atividade mineradora contribui para o aumento da poluição do ar através da emissão de partículas durante os processos de quebras e desmontes das rochas, em consonância com a poluição ocasionada pela queima de combustível de transportes e/ou máquinas pesadas que atuam no local (Silva e Andrade, 2017). A poeira formada em áreas como esta, se aglomera sobre a superfície da Terra e ocasiona na diminuição da radiação da luz solar, que por consequência pode nos causar deficiência em vitamina D (Fellenberg, 1997). De acordo com Dutra (1997), inspirar esta poeira é prejudicial à saúde, se estivermos expostos a essa ação por um longo período. Isso pois ela permeia os pulmões de forma profunda e se solidifica nas vias respiratórias ocasionando em irritações crônicas das mucosas. Pode-se afirmar que além da atividade mineradora contribuir na alteração e degradação da área e áreas do entorno, ela está diretamente relacionada a problemas de saúde relacionados às vias respiratórias dos seres humanos, tornando-se assim um assunto amplamente significativo para qualidade de vida.

### **4.3 Líquens**

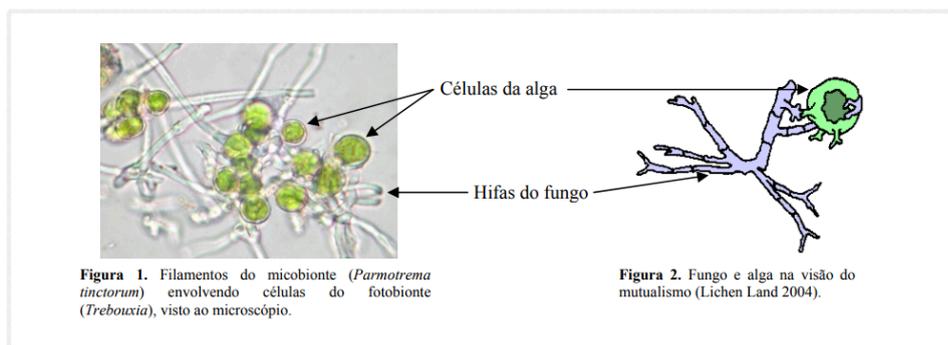
Os líquens são considerados a união simbiótica de fungos e algas. Pode-se afirmar que o termo alga se refere a uma cianobactéria ou uma clorofícea. Já o

fungo, é normalmente um Ascomiceto (98% dos líquens), embora possa vir a ser em determinadas condições um Basidiomiceto ou um Ficomiceto (Conti & Cechetti, 2001).

Segundo Alexopoulos et al. (1996), os fungos ascomicetos, também conhecidos como ascomicetos ou ascomicotas, são um grupo diverso de fungos pertencentes à divisão Ascomycota. Eles são chamados assim devido à presença de estruturas chamadas ascos, que são bolsas ou sacos onde ocorre a formação e a liberação de esporos. Esses esporos são produzidos internamente nos ascos e são liberados quando maduros. Os ascomicetos apresentam uma ampla variedade de formas e tamanhos. Alguns são microscópicos, enquanto outros podem ser observados a olho nu, como o mofo do pão. Alguns exemplos conhecidos de ascomicetos incluem cogumelos do gênero *Morchella* (cogumelos mais conhecidos como "morilles"), trufas, leveduras, líquens e muitos tipos de fungos filamentosos encontrados em ambientes terrestres e aquáticos.

Na associação fungo e alga, cada um desenvolve seu papel, sendo a alga responsável pela formação de nutrientes devido a presença de clorofila e o fungo responsável pelo fornecimento de água e minerais à alga. Os componentes da simbiose líquênica são designados por nomes específicos. As algas verdes ou cianobactérias, devido à sua capacidade de realizar a fotossíntese, são denominadas fotobiontes (foto = luz; bionte = organismo vivo), enquanto os fungos são chamados de micobiontes (mico = fungo; bionte = organismo vivo) (figura 1). Dessa forma, podemos afirmar que o líquen é a união de um micobionte com um fotobionte. Esses organismos, têm um crescimento lento e dependem diretamente do ambiente para sua nutrição e diferentemente das plantas vasculares, eles não perdem partes durante seu processo de crescimento. Outro fato, imprescindível de mencionar, é que não possuem cutícula ou estoma como as plantas, isso ocasiona na absorção de contaminação por toda a sua superfície (Hale, 1983).

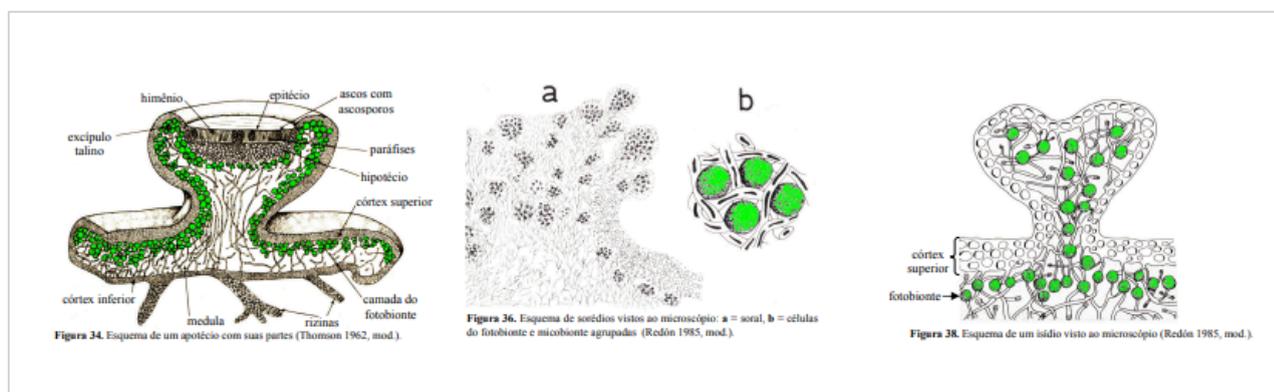
Figura 1 - Associação de um micobionte a um fotobionte.



Fonte: Spiellmann & Marcelli, 2006.

Ainda sobre seu desenvolvimento, de acordo com Spiellmann (2006) e Hale (1983), os líquens têm a capacidade de se reproduzir de forma direta ou indireta. Na reprodução direta, tanto o micobionte quanto o fotobionte possuem seus próprios mecanismos de reprodução e, posteriormente, se unem para formar o líquen. Nos micobiontes (Ascomycota), a reprodução direta pode ocorrer por meio de estruturas especializadas chamadas apotécios ou peritécios. Por outro lado, na reprodução indireta, o micobionte e o fotobionte desenvolvem órgãos especializados, como sorédios e isídios (figura 2). Os sorédios consistem em aglomerados de células do fotobionte que estão entrelaçadas com hifas do micobionte, e não possuem uma camada protetora externa (córTEX). Por outro lado, os isídios são pequenos ramos especializados que se destacam facilmente do talo do líquen devido à ação mecânica da chuva e do vento. Esses isídios podem se desprender e dar origem a um novo líquen, iniciando assim um novo ciclo reprodutivo para a espécie.

Figura 2 - Estrutura e órgãos especializados em líquens.



Fonte: Spiellmann & Marcelli, 2006.

Nos dias de hoje, são conhecidas em torno de 18.000 espécies mundialmente e a nível nacional, há registro de 2.784 espécies (Spielmann & Marcelli 2008). Os primeiros estudos no estado do Rio Grande do Sul iniciaram em 1900 com a comunidade liquênica, estes resultaram até o momento na identificação de 912 espécies de fungos liquenizados (Spielmann, 2007).

#### **4.4 Bioindicadores**

Bioindicadores são organismos vivos que são utilizados para avaliar a qualidade ambiental de um determinado ecossistema. Esses organismos possuem sensibilidade a determinados estresses ambientais ou contaminantes, o que os torna indicadores das condições do ambiente em que vivem. Segundo Conti et. al. (2016) os bioindicadores podem ser utilizados para monitorar a presença ou os efeitos de poluentes, identificar mudanças ambientais e até mesmo auxiliar no diagnóstico de problemas ambientais. Os bioindicadores podem ser encontrados em diferentes formas, como plantas, animais e microorganismos. Cada grupo de organismos possui características específicas que os tornam adequados para diferentes tipos de avaliação ambiental. Por exemplo, alguns bioindicadores vegetais podem acumular metais pesados em suas estruturas, enquanto certos animais aquáticos são sensíveis a alterações na qualidade da água.

Nos últimos 30 anos, diversos estudos vêm relacionando os líquens com a capacidade de bioindicação de diversos poluentes na atmosfera, isso ocorre devido sua alta sensibilidade aos compostos, que ocasionam neles mudanças físicas e químicas. É imprescindível citar que os líquens são caracterizados por sua estrutura morfológica, Hawksworth et. al. (1995) classificou os líquens em três tipos distintos, que são:

a) Líquen Crostoso: Esses líquens se assemelham a uma crosta, apresentando uma estrutura dorsiventral, geralmente achatada (figura 3). Seu crescimento é mais pronunciado em circunferência e eles estão parcialmente imersos no substrato. Os líquens crostosos não possuem córtex inferior e sua superfície pode ser caracteristicamente verrucosa ou quebradiça. Eles também podem ser cercados por um protalo pálido ou escuro, que não contém células fotobiontes.

b) Líquen Folioso: Os líquens foliosos têm uma estrutura dorsiventral, assim como os líquens crostosos (figura 4), mas se diferenciam por serem menos aderidos ao substrato e por apresentarem um córtex inferior. Eles crescem mais pronunciadamente em circunferência e estão fixados ao substrato por estruturas próprias, como rizinas ou tomento. Os líquens foliosos possuem lobos (divisões mais ou menos arredondadas) ou lacínias (divisões alongadas) bem definidas.

c) Líquen Fruticoso: Esses líquens são caracterizados por apresentarem ramos, que podem ser simples, divididos, cilíndricos ou achatados, assemelhando-se a arbustos ou barbas (figura 5). São os maiores e mais complexos entre os tipos de líquens, podendo ser pendentes ou eretos, semelhantes a cabelos ou tiras, frequentemente altamente ramificados. Eles possuem uma estrutura radial ao redor de uma cavidade central ou um eixo axial e estão fixados ao substrato por pequenos grampos discoidais ou conjuntos de rizóides.

Figura 3 - Líquen crostoso encontrado na área da UNIPAMPA.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 4 - Líquen folioso encontrado na área da UNIPAMPA.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 5 - Líquen fruticoso encontrado na área da UNIPAMPA.



Fonte: Autora, 2023.

Os líquens são utilizados como bioindicadores de duas diferentes formas (Gries, 1996):

1. Mapeando todas as espécies de líquens presentes em uma determinada área;
2. Realizar amostragem de uma espécie de líquen quantificando os poluentes acumulados nele ou transplantando um líquen de uma área não contaminada para uma área contaminada e mensurando os resultados através da mudança física, morfológica e acúmulo de poluentes neste.

#### **4.5 Qualidade do ar e Índice de Pureza Atmosférica (IPA)**

De acordo com informações sobre comportamento liquênico citadas anteriormente, pode-se afirmar que as mudanças na composição das comunidades de líquens estão diretamente relacionadas aos níveis de poluição atmosférica. No monitoramento passivo, uma comunidade de líquens pode ser avaliada por meio de informações qualitativas, como listas de espécies e mapas de distribuição, ou através de métodos quantitativos, como o cálculo do Índice de Pureza Atmosférica (IPA), proposto por Le Blanc e De Sloover (1970), fundamentado na sensibilidade desses organismos à poluição.

No Brasil, a qualidade do ar é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que estabelece os padrões de qualidade do ar a serem observados, incluindo limites para poluentes como material particulado (MP10 e MP2,5), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e ozônio (O<sub>3</sub>). A integração desses padrões ao monitoramento liquênico permite correlacionar as variações nas comunidades de líquens aos limites estabelecidos, oferecendo uma ferramenta complementar para avaliação ambiental.

O uso do IPA, aliado aos padrões nacionais da qualidade do ar, fornece uma abordagem integrada para o biomonitoramento, destacando-se pela simplicidade de aplicação e pela capacidade de detectar mudanças ambientais ao longo do tempo. Essa combinação de métodos qualitativos e quantitativos fortalece a avaliação da qualidade do ar e auxilia na implementação de políticas públicas voltadas à saúde ambiental e ao bem-estar da população.

Este nos possibilita uma avaliação do nível de poluição atmosférica, através da razão entre o somatório da frequência de líquens e o número de indivíduos arbóreos amostrados nos pré-determinados pontos de coleta. Dentre os métodos numéricos, o Índice de Pureza Atmosférica (IPA) tem sido amplamente utilizado e apresenta resultados que demonstram uma correlação significativa entre as variáveis de poluição e industrialização (Hawksworth & Rose, 1970). Após a aplicação da fórmula da expressão 1, é possível analisar os resultados e os dados obtidos por meio da Tabela 1.

$$IPA = \sum \frac{F}{n} \quad (1)$$

Em que:

- $\sum F$ : somatório da frequência de líquens
- $n$ : número de indivíduos arbóreos amostrados no ponto.

Tabela 1 – Classificação da qualidade do ar em relação ao IPA.

IPA	Contaminação do Ar	Qualidade do ar
IPA < 1	Extremamente alta	Péssima
1 ≤ IPA < 4	Muito alta	Muito alta
4 ≤ IPA < 8	Alta	Má
8 ≤ IPA < 13	Média - alta	Medíocre
13 ≤ IPA < 19	Média	Baixa
19 ≤ IPA < 26	Média - moderada	Média
26 ≤ IPA < 34	Moderada	Discreta
34 ≤ IPA < 43	Baixa	Boa
IPA ≥ 43	Muito baixa	Muito boa

Fonte: Adaptado de Ferreira (2008).

## 5 METODOLOGIA

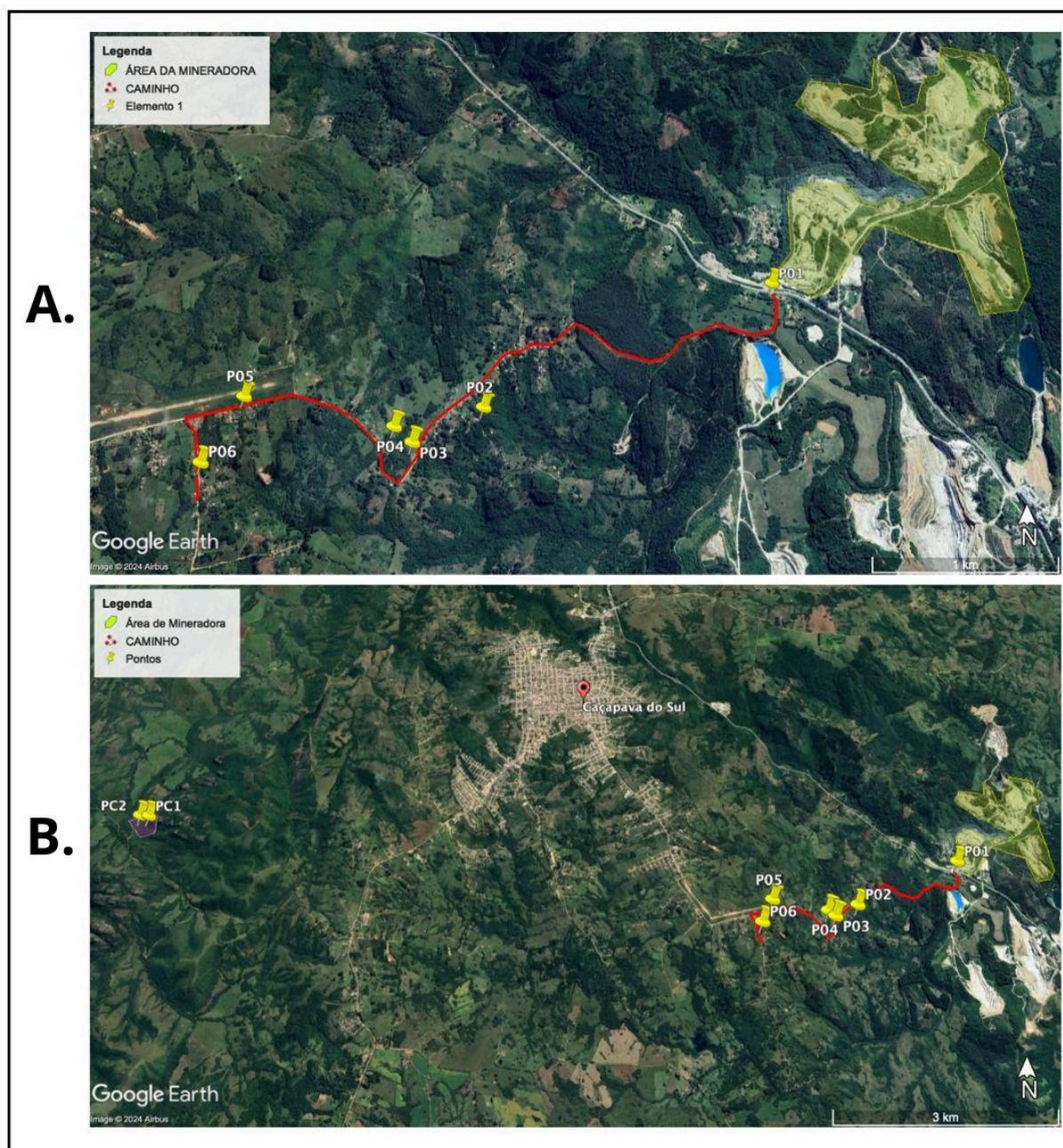
### 5.1 Área de estudo

A área de estudo, no município de Caçapava do Sul está estabelecida, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, na Mesorregião Sudeste Rio Grandense e na Microrregião da Serra do Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul, esta abrange uma área de 3.047,126 Km<sup>2</sup>, estando localizada a aproximadamente de 260 km da capital Porto Alegre. O clima da região se classifica como mesotérmico brando super-úmido atingindo esta área e quanto à temperatura, observa-se uma amplitude térmica considerável que determina uma média anual de 18°C podendo chegar até 38°C no verão, e no inverno poderá ocorrer à formação de 15 a 20 geadas (IBGE).

O município é sustentado praticamente na totalidade, pelos setores da mineração (representa cerca de 80% do calcário total produzido no estado do RS) e agricultura. A porcentagem de calcário total produzido na localidade já indica que haja predominância de mineração, que é um dos principais responsáveis pela contaminação do ar através de material particulado.

Os pontos de coleta foram distribuídos entre o posto de combustíveis Pedreira, na BR 392, próximo a entrada das principais mineradoras de calcário da região, localidade conhecida como Caieiras, até as proximidades da Aviação, na área urbana da cidade (figura 6). Dessa forma, será abrangida uma ampla área com potenciais fontes de contaminação, incluindo locais de atividade mineradora e áreas urbanas, além de pontos intermediários ao longo dessas regiões, totalizando pelo menos 6 pontos de amostragem. Além disso, foram selecionados dois pontos de amostragem dentro do Parque Natural Municipal Pedra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, com o objetivo de servir como áreas de controle. Esse local, afastado das zonas urbanas e de mineração, oferece condições ambientais mais preservadas, com menor influência de poluentes atmosféricos.

Figura 6 - Mapas de localização: a. Distribuição dos pontos de estudo; b. Distribuição geral dos pontos, incluindo pontos de controle.



Fonte: Autora, 2024.

Tabela 2 – Distância dos pontos amostrados em relação à área mineradora

Ponto	Distância (m)
1	250
2	2.526

Ponto	Distância (m)
3	2.540
4	2.973
5	3.275
6	3.545
PC1	13.200
PC2	13.200

Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

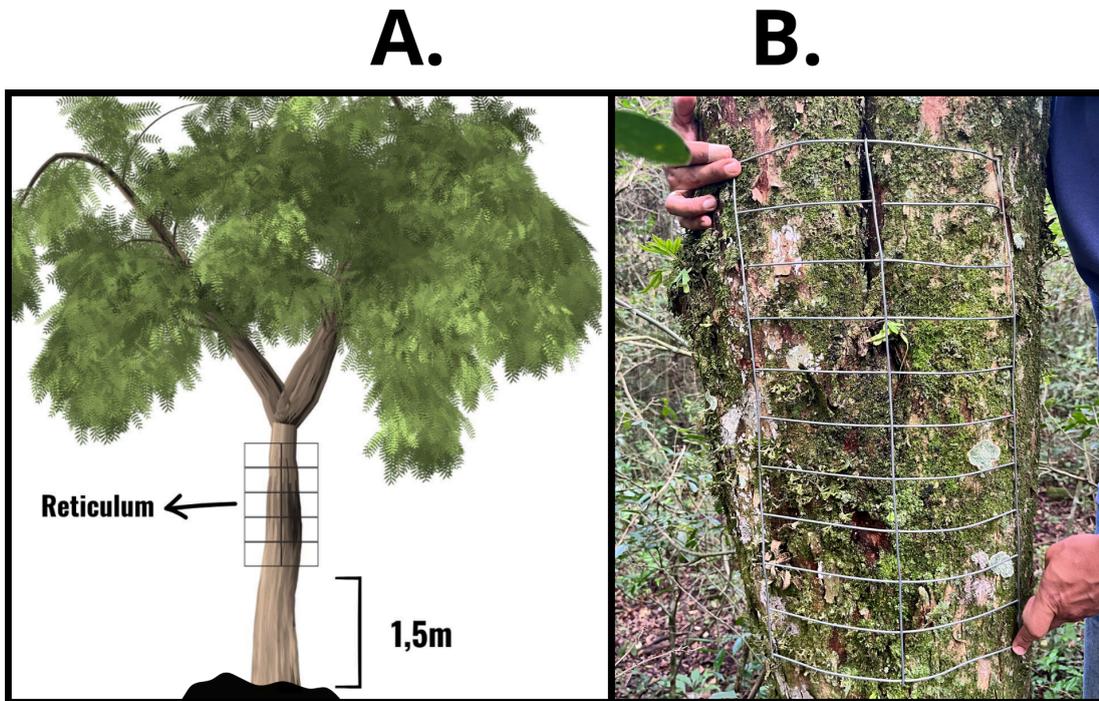
## 5.2 Amostragem e coleta de dados

As amostragens ocorreram em 6 pontos ao longo do trajeto, a uma distância estimada de 200 metros da via principal (estrada vicinal), desde o posto Pedreira até as proximidades da Aviação. Além disso, dois pontos foram definidos no Parque Natural Municipal Pedra do Segredo, que serviram como áreas de comparação. Em cada ponto de coleta, foram utilizados 6 forófitos selecionados com base no critério de Diâmetro à Altura do Peito (DAP) superior a 5 cm e com escolha aleatória. Os pontos para análise dos forófitos foram atribuídos aleatoriamente no mapa previamente à coleta.

Para as análises dos líquens, foi utilizada uma metodologia quali-quantitativa, que combinou a identificação das espécies com a quantificação da área de ocupação no tronco dos forófitos. A abordagem incluiu o uso de um *reticulum* (figura 7), confeccionado em arame, com dimensões de 30 cm de largura por 50 cm de altura e subdividido em quadrantes de 10 por 15 cm, conforme descrito por Ferreira (2008). Este *reticulum* foi posicionado sobre o caule dos forófitos a uma altura de 1,5 metro (figura 8), e fotografias foram tiradas para posterior análise e quantificação de pixels. Todas as imagens capturadas foram padronizadas com dimensões de 1350 x 1080 pixels, assegurando padronização na análise. As imagens foram importadas para o software JMicroVision. No software, foi realizado um processo de distinguir áreas ocupadas por líquens com base em parâmetros de cor e textura. O software permitiu a quantificação da área ocupada por líquens em pixels para cada imagem

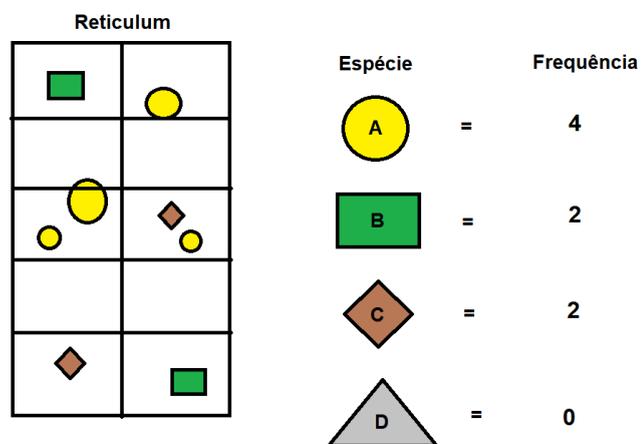
analisada, e os valores obtidos foram convertidos em porcentagem, considerando a área total padronizada de 1.458.000 pixels por imagem.

Figura 7 - Reticulum: a. ilustração do reticulum posicionado sobre o caule do forófito; b. reticulum posicionado em um dos forófitos em campo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

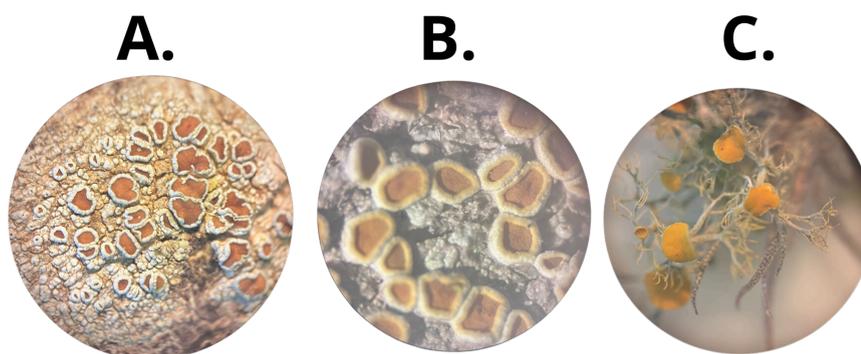
Figura 8 - Frequência dos líquens dentro da área do reticulum com finalidade de contagem.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2008)

A identificação das espécies de líquens foi realizada no laboratório de Toxicologia e Meio Ambiente, localizado no Campus Caçapava do Sul, utilizando o registro fotográfico e amostras coletadas, assim como a lupa e microscópio quando necessário (Figura 9). Fontes como o USDA Plants Database (<https://plants.usda.gov/home>), a Checklist of lichens and Lichenicolous Fungi of Rio Grande do Sul (Spielmann, 2006), bem como o artigo *Gêneros de Fungos Liquezados dos Manguezais do Sul-Sudeste do Brasil, com enfoque no manguezal do Rio Itanhaém, Estado de São Paulo* (Benatti & Marcelli, 2007), foram utilizados como referência para a identificação. Esses materiais forneceram descrições taxonômicas detalhadas e chaves analíticas para a identificação de gêneros. A análise da área de ocupação foi feita com o auxílio do software JMicroVision, que permite calcular as áreas ocupadas por cada espécie nos troncos analisados.

Figura 9 - Espécies fotografadas em lupa de aumento: a. *Haematomma* sp; b. *Lecanora* sp; c. *Teloschistes* sp.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 5.3 Análise dos dados

Com base nos dados coletados, foi realizado o cálculo do Índice de Pureza do Ar (IPA), utilizando a modificação do método proposto por Kaffer (2011). O IPA foi determinado pela soma da frequência de ocorrência de líquens dividida pelo número total de forófitos amostrados em cada ponto. A comparação dos valores foi realizada de acordo com a classificação estabelecida por Ferreira (2008), conforme apresentado na Tabela 1.

Além disso, os valores do IPA foram submetidos à análise de Correlação Linear, com o cálculo do coeficiente de Pearson, em relação à distância dos pontos

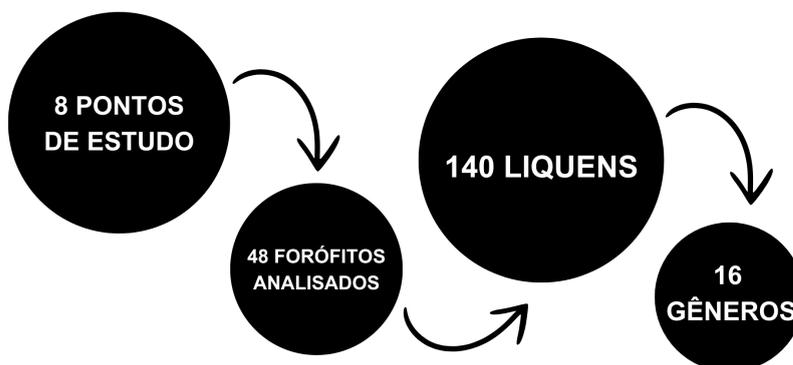
de amostra da atividade de mineração. O objetivo foi investigar estatisticamente se a contaminação proveniente dessas fontes estivesse afetando a população de líquens, confirmando assim o seu potencial como bioindicadores. Essas análises proporcionaram uma compreensão mais aprofundada da relação entre a presença de líquens, a contaminação atmosférica e a proximidade das fontes de poluição. Dessa forma, foi possível avaliar o impacto da atividade mineradora e da área urbana na qualidade do ar e na saúde dos líquens, fornecendo informações para a implementação de medidas de proteção e conservação ambiental.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Identificação de gênero das amostras

Durante as análises laboratoriais, foram coletadas 140 espécimes de líquens, de 16 gêneros diferentes (Figura 10).

Figura 10 - Resumo quantitativo dos dados de amostragem de líquens

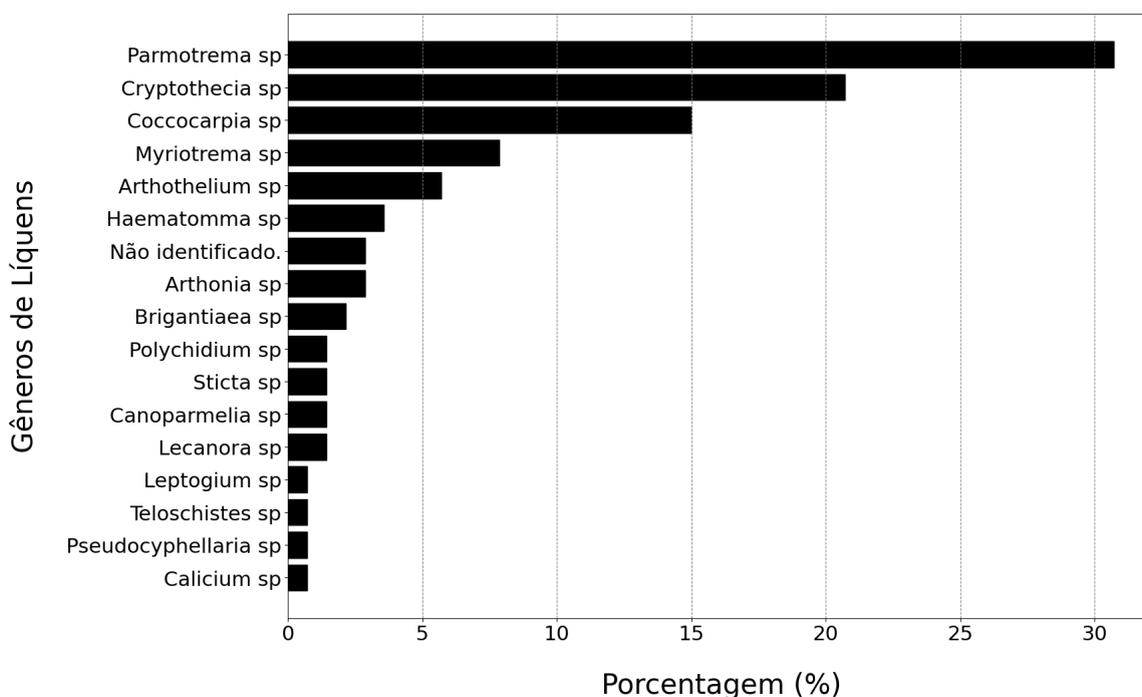


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A figura 11 demonstra como esses gêneros estão distribuídos em termos percentuais, destacando a predominância de alguns grupos. O gênero *Parmotrema sp* apresentou a maior frequência, representando aproximadamente 30,7% do total de amostras coletadas. Em seguida, aparecem os gêneros *Cryptothecia sp* (20,7%) e *Coccocarpia sp* (15,0%), que juntos totalizam mais da metade das identificações. Outros gêneros, como *Myriotrema sp* (7,9%), *Arthothelium sp* (5,7%) e *Haematomma sp* (3,6%), possuem representatividade intermediária, contribuindo para a diversidade geral da comunidade liquênica. Já gêneros como *Leptogium sp*, *Teloschistes sp*, *Pseudocyphellaria sp* e *Calicium sp* foram encontrados em menor proporção, com apenas 0,7% das amostras cada, o que pode sugerir uma presença

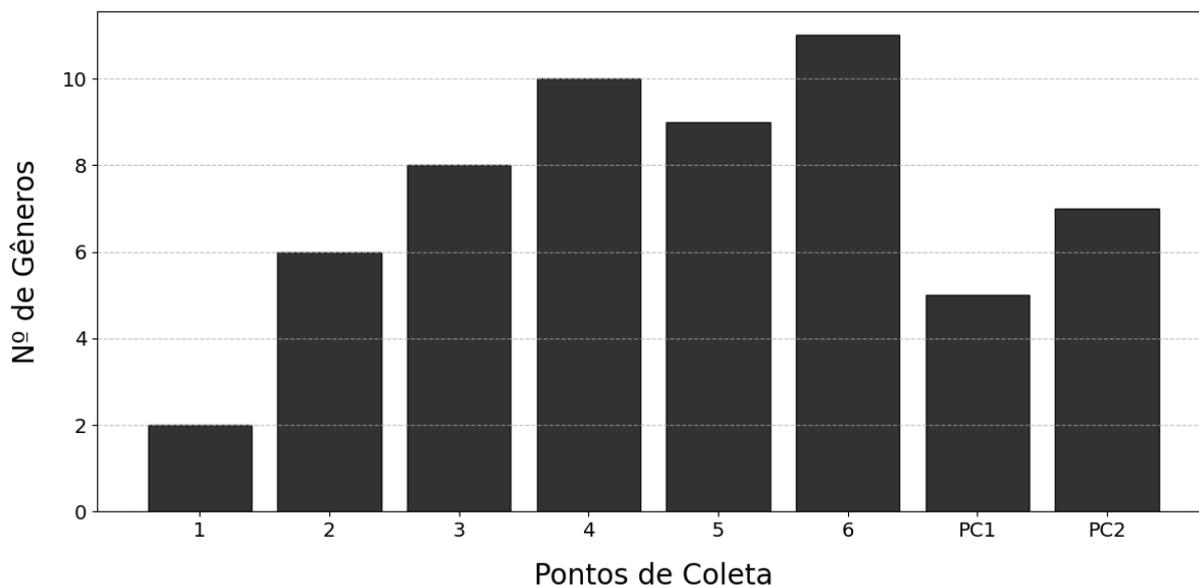
mais restrita ou condições menos favoráveis para seu desenvolvimento. Essa distribuição evidencia a diferença na qualidade do ar, que é imprescindível para que as espécies se desenvolvam, presente nos pontos analisados. Observa-se na Figura 12, que os pontos mais próximos à atividade mineradora apresentam uma menor diversidade de gêneros, com destaque para o ponto 1, que apresentou o menor número de gêneros. À medida que aumenta a distância da fonte emissora, ocorre um aumento na diversidade líquênica, com o ponto 6 apresentando o maior número de gêneros identificados. Essa relação reforça a influência da contaminação atmosférica sobre a biodiversidade, sendo que os pontos controle, ainda mantêm uma diversidade significativa, embora ligeiramente inferior ao ponto 6.

Figura 11 - Porcentagem por gênero de líquen identificado.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

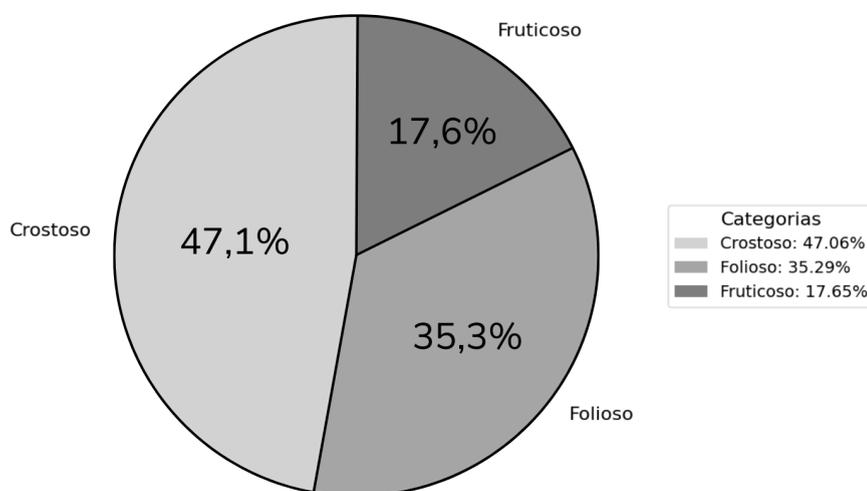
Figura 12 - Diversidade de gêneros líquênicos por ponto de coleta.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A partir da identificação de gênero, foi possível distribuir as espécies de acordo com sua estrutura morfológica (Figura 13). Identificou-se predominância crostosa, correspondendo a 47,06% do total de líquens identificados. Em seguida, os líquens com estrutura foliosa representaram 35,29%, enquanto os fruticosos tiveram a menor frequência, 17,65% das amostras analisadas. A predominância da forma crostosa pode ser explicada por sua maior capacidade de aderência aos troncos das árvores, o que permite uma maior resistência às adversidades ambientais, incluindo altos níveis de poluição atmosférica, material particulado em suspensão e variações bruscas de temperatura e umidade. Os líquens foliosos, embora menos predominantes, refletem adaptação a ambientes com maior estabilidade e menor interferência de poluentes. Por outro lado, os líquens fruticosos, com estrutura tridimensional mais delicada, apresentaram a menor representatividade, possivelmente devido à sua maior sensibilidade a condições ambientais e à suspensão de poluentes na atmosfera, como partículas finas e gases tóxicos, que comprometem seu desenvolvimento.

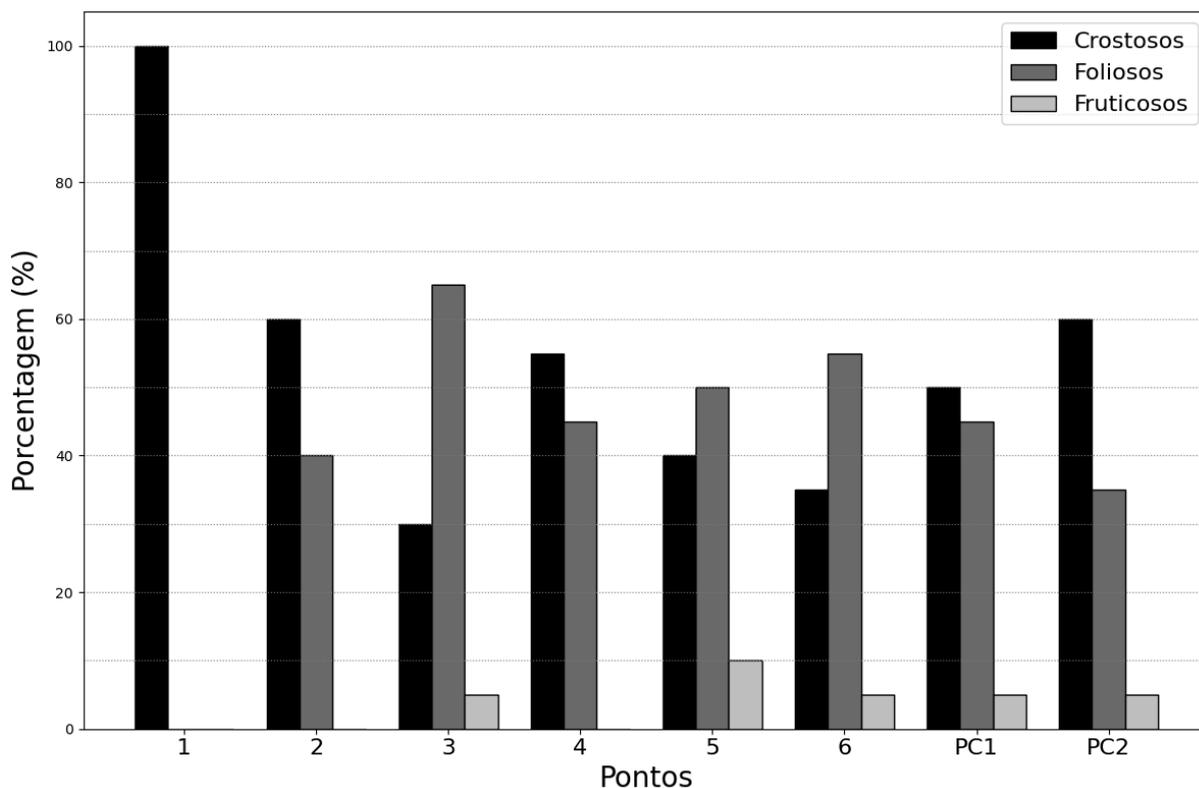
Figura 13 - Identificação por estrutura morfológica das amostras



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A figura 14 traz a proporção de hábitos estruturais (crostosos, foliosos e fruticosos) dos líquens em cada ponto. Nos pontos mais próximos à mineração (Pontos 1 e 2), os líquens crostosos predominam, indicando maior resistência desses gêneros a ambientes com alta poluição. Já nos pontos mais distantes (como PC1 e PC2), há uma maior proporção de líquens foliosos e fruticosos, que são indicativos de ambientes com melhores condições ambientais, menos impactados por agentes poluentes.

Figura 14 - Identificação de estrutura morfológica por ponto de amostragem.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

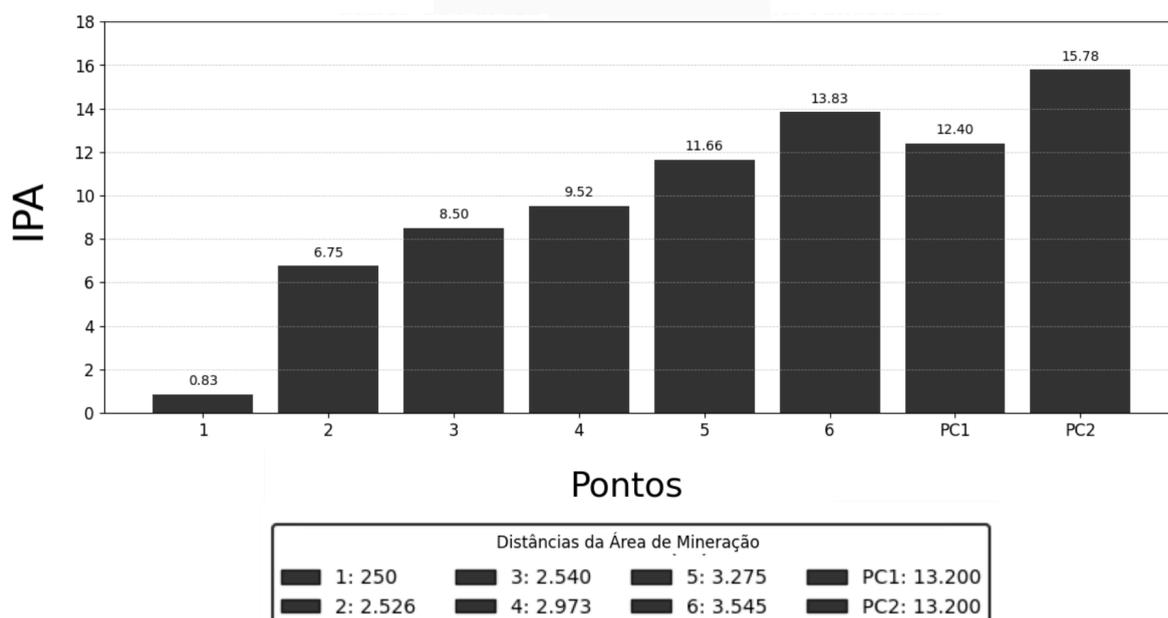
## 6.2 Índice de Pureza do Ar (IPA)

Os resultados indicam diferenças nos Índices de Pureza do Ar (IPA) entre os pontos de amostragem, refletindo variações significativas na qualidade do ar e nos impactos ambientais ao longo da área de estudo (Figura 15).

No Ponto 1, localizado próximo à área mineradora, o IPA de 0,83, classificado como "péssimo" segundo Ferreira (2008), confirma uma contaminação extremamente alta. A baixa diversidade de líquens e a predominância de espécies crostosas, adaptadas a ambientes poluídos, destacam o impacto severo da mineração na qualidade ambiental. Já nos pontos 2 e 3, situados a 1,8 km e 2,3 km da mineração, respectivamente, houve uma melhora gradativa. O Ponto 2 apresentou um IPA de 6,75, indicando contaminação alta e qualidade do ar má. A presença predominante de líquens crostosos e algumas espécies folhosas, mais sensíveis, sugere uma redução nos níveis de poluentes. No Ponto 3, o IPA foi de 8,50, refletindo contaminação média-alta e qualidade do ar medíocre. A maior diversidade de líquens, incluindo folhosos, indica uma melhoria relativa nas condições ambientais, possivelmente devido à dispersão dos poluentes e menor

concentração nas proximidades. Nos Pontos 4 e 5, localizados em áreas rurais intermediárias, os IPAs de 9,52 e 11,66 indicam contaminação média-alta e qualidade do ar medíocre. A presença de líquens foliosos mais diversificados reflete um ambiente com menor interferência de poluentes em comparação aos pontos próximos à mineração. No Ponto 6, o mais distante da área mineradora, o IPA de 13,83 indica contaminação média e qualidade do ar baixa. Embora ainda exista influência de poluentes, a maior diversidade de líquens sugere melhores condições ambientais em comparação aos pontos próximos às fontes de poluição. Nos pontos de controle, PC1 e PC2, situados no Parque da Pedra do Segredo, as melhores condições de qualidade do ar foram observadas. O ponto PC1 apresentou um IPA de 12,40, indicando uma qualidade do ar baixa e contaminação média. Já o PC2, apresentou o maior IPA da análise, com um valor de 15,78, classificando-se da mesma forma que o PC1.

Figura 15 - Índice de Pureza do Ar (IPA) por ponto amostrado.

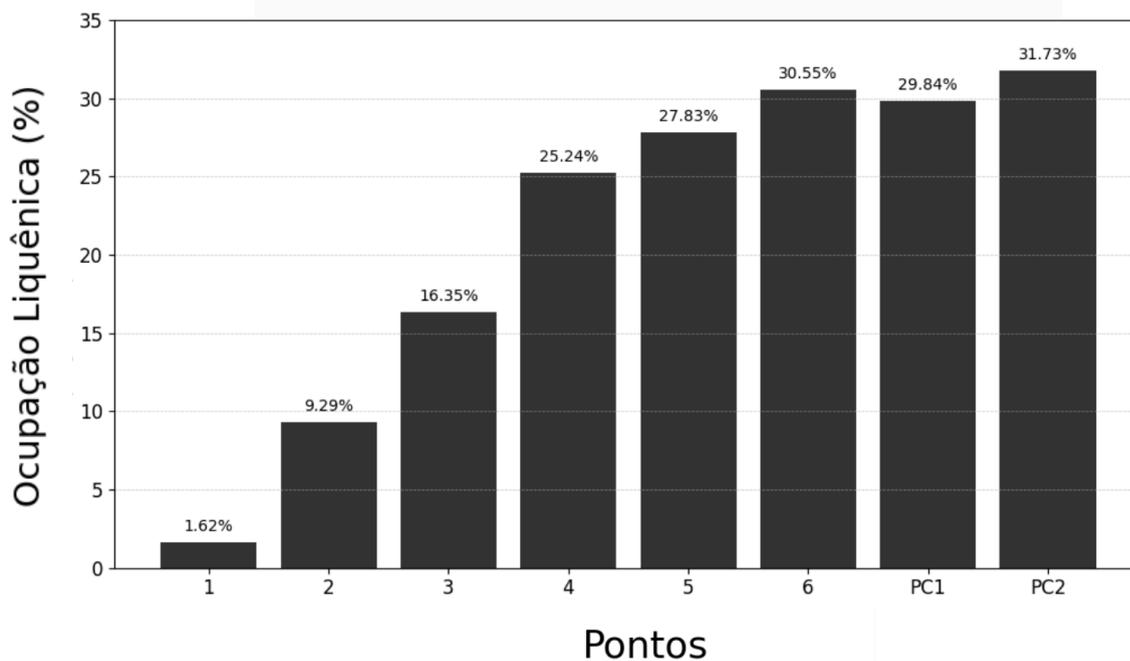


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 6.3 Quantificação da área ocupada

Os resultados referentes à ocupação líquênica foram obtidos por meio de medições realizadas com o auxílio do software JMicroVision, que possibilitou a quantificação das áreas ocupadas por líquens em cada ponto amostrado (Figura 16).

Figura 16 - Ocupação Líquênica (%) por ponto amostrado



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

No Ponto 1, a área ocupada foi a menor registrada, indicando uma cobertura reduzida e baixa biodiversidade líquênica, consistente com as condições ambientais severas e a alta concentração de poluentes na proximidade da mineração. Nos pontos 2 e 3, houve um aumento na área ocupada, acompanhado de uma maior presença de líquens foliosos, que são menos resistentes à poluição em comparação aos crostosos. Essa elevação na área ocupada sugere uma diminuição gradual dos poluentes em suspensão à medida que nos afastamos da principal fonte de contaminação. Nos pontos 4 e 5, localizados em áreas rurais intermediárias, as áreas ocupadas foram ainda maiores, indicando uma redução nos níveis de poluição. A presença de líquens mais diversificados reflete uma condição ambiental mais equilibrada, embora ainda com alguma interferência de poluentes.

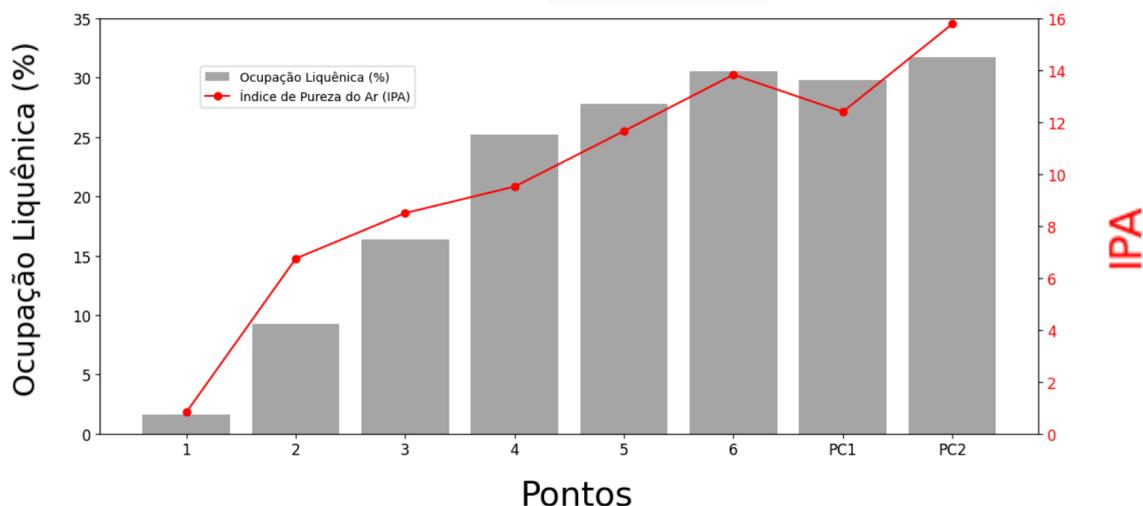
No Ponto 6, situado no limite mais distante da área de mineração e próximo à transição para zonas menos impactadas, a área ocupada apresentou valores intermediários entre os pontos rurais e os pontos controle. A diversidade líquenica observada incluiu uma proporção maior de líquens foliosos, indicando uma recuperação gradual da qualidade ambiental. Embora os níveis de ocupação não atinjam os observados nos pontos de controle, o Ponto 6 demonstra uma melhoria significativa em comparação às áreas mais impactadas, reforçando a relevância da distância das fontes de poluição para a regeneração líquenica.

Nos pontos de controle (PC1 e PC2), as áreas ocupadas alcançaram os picos máximos, evidenciando a maior biodiversidade líquenica. A elevada cobertura por líquens foliosos e fruticosos nestas áreas protegidas destaca a influência positiva da preservação ambiental. Esses resultados ressaltam a importância das áreas de conservação como referência para avaliar os impactos antrópicos em regiões próximas, contribuindo para a manutenção da saúde ambiental.

#### **6.4 Correlação entre os dados**

A Figura 17 apresenta a relação entre o Índice de Pureza do Ar (IPA) e a ocupação líquenica (%) nos diferentes pontos amostrados. Observa-se que, nos pontos mais próximos à área mineradora (Ponto 1), tanto o IPA quanto a ocupação líquenica são baixos, indicando condições ambientais impactadas pela poluição atmosférica. À medida que a distância da fonte emissora aumenta, ocorre um crescimento tanto no IPA quanto na ocupação líquenica, demonstrando uma melhora na qualidade do ar e uma maior biodiversidade de líquens. Nos pontos de controle (PC1 e PC2), localizados em uma área protegida, os valores mais elevados de IPA e ocupação líquenica refletem as melhores condições ambientais, reforçando a eficácia dos líquens como bioindicadores sensíveis à qualidade do ar. A correlação entre as variáveis sugere que o impacto ambiental diminui significativamente com o aumento da distância da área de mineração.

Figura 17 - Ocupação Liqueânica (%) e Índice de Pureza do Ar por ponto amostrado

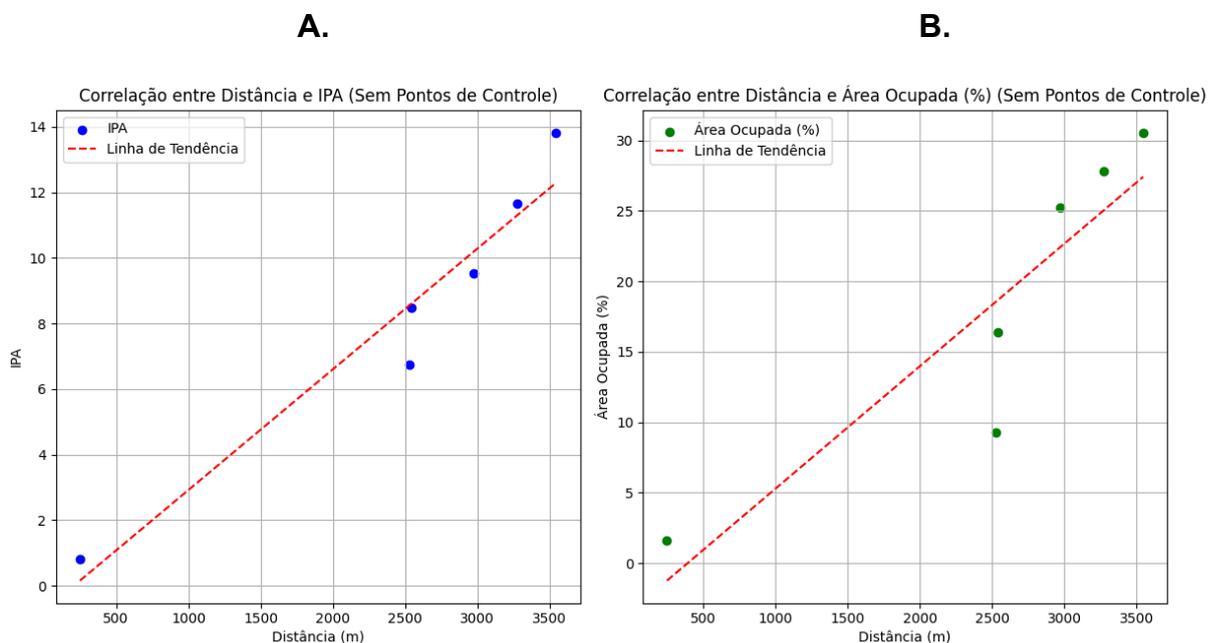


Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os gráficos apresentados na Figura 18, ilustram a correlação linear entre a distância da área mineradora e os dois parâmetros, excluindo os pontos de controle (PC1 e PC2). No primeiro gráfico, observa-se uma relação direta entre a distância e o IPA, evidenciada pela inclinação positiva da linha de tendência. O coeficiente de correlação de Pearson, calculado como  $r=0,98$ , indica uma forte correlação positiva. Este resultado sugere que, à medida que a distância da fonte poluidora aumenta, o IPA também cresce, refletindo uma melhora na qualidade do ar.

De forma similar, o segundo gráfico apresenta a relação entre a distância e a área ocupada por líquens, também com uma linha de tendência inclinada positivamente. O coeficiente de correlação de Pearson para esta análise é  $r=0,95$ , novamente demonstrando uma forte correlação positiva. Este resultado indica que a ocupação líquênica tende a aumentar em locais mais distantes da fonte de poluição, reforçando a sensibilidade dos líquens como bioindicadores ambientais.

Figura 18 - Gráficos de correlação linear: a. Correlação entre distância e IPA; b. Correlação entre distância e área ocupada.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

As linhas de tendência destacadas em ambos os gráficos representam as melhores aproximações lineares para os dados observados. A inclinação positiva das linhas reforça a hipótese de que a proximidade da mineradora impacta negativamente a biodiversidade e a qualidade ambiental. Assim, a análise corrobora que as condições ambientais melhoram progressivamente à medida que se afasta da área de mineração, confirmando a capacidade do uso de líquens e do IPA como ferramentas para avaliação da qualidade do ar.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas para monitoramento da poluição atmosférica em Caçapava do Sul, utilizando líquens como bioindicadores, demonstraram a eficácia dessa abordagem no diagnóstico da qualidade do ar. A metodologia empregada, que combinou análises qualitativas e quantitativas, revelou como a biodiversidade líquênica e o Índice de Pureza do Ar (IPA) refletem diretamente os impactos ambientais decorrentes das atividades mineradoras. Os resultados, como esperado, evidenciaram uma correlação positiva significativa entre a distância das áreas

mineradoras e a melhoria da qualidade do ar, validada pelos altos valores do coeficiente de correlação de Pearson.

Além disso, as diferenças na ocupação líquênica e no IPA entre os pontos amostrados ressaltaram a influência das fontes de poluição na biodiversidade e saúde ambiental. Os dados demonstram que, em áreas próximas à mineração, a diversidade de líquens é reduzida, com predominância de espécies resistentes, enquanto pontos mais afastados exibem maior variedade de líquens foliosos e fruticosos, indicativos de ambientes menos impactados.

Por fim, este estudo contribui significativamente para o entendimento local da qualidade do ar, destaca-se a necessidade de ações de monitoramento contínuo e preservação ambiental, especialmente em áreas com atividades mineradoras intensas. Assim, espera-se que este trabalho fomente políticas públicas mais eficazes e conscientize tanto empresas quanto comunidade acadêmica sobre a importância do monitoramento contínuo e da gestão sustentável dos recursos naturais.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. W. et. al. **Efeitos do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) em líquens, Rio Grande do Sul, Brasil.** *Iheringia Botanica*, (1998) 50, 67–73.
- ARAÚJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. **Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente.** In: Recursos minerais e sociedade: impactos humanos - socioambientais - econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.
- ALEXOPOULOS C. J. et. al. **Introductory Mycology.** References - Scientific Research Publishing. 4 ed., New York, 1996.
- BENATTI, Michel Navarro; MARCELLI, Marcelo Pinto. **Gêneros de fungos liquenizados dos manguezais do Sul-Sudeste do Brasil, com enfoque no manguezal do Rio Itanhaém, Estado de São Paulo.** *Acta Botanica Brasílica*, v. 21, n. 4, p. 863-878, 2007.
- CANÇADO, J. E. D. et al. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica.** *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 32, p. S5–S11, 2006.
- CESAR, G. C. A.; NASCIMENTO, C. F. L.; CARVALHO, A. J. **Associação entre exposição ao material particulado e internações por doenças respiratórias em crianças.** *Revista de Saúde Pública*, v.47, n.6, p.1209-12, 2013.
- CONTI, M. E., CECCHETTI, G. **Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment - a review.** *Environmental Pollution*, v. 114, p. 471-75, 2001.
- CONTI, M. E., TUDINO, M. **Lichens as Biomonitors of Heavy-Metal Pollution.** *Comprehensive Analytical Chemistry - The Quality of Air*. 2016.
- COPPINS, B.J. FERRY, B.W.; BADDELEY M.S.; HAWKSWORTH D.L. **Air pollution and lichens.** The Athlone Press, London, p. 124-142. 1973.
- DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. **Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores.** *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, [S. I.], v. 18, n. 1, p. 66–78, 2014.
- DUTRA, A. **Os efeitos do pó no pulmão.** Ed. 12. INFOSEG. E.P.U./EDUSP. 1997. p.31, 32, 34, 28 - 61.
- FELLENBERG, G. **Introdução aos problemas da poluição ambiental.** São Paulo.
- FERREIRA, E. J. P. D. **Biomonitorização da qualidade do ar: Caso-estudo na envolvente da fábrica de celulose do Caima.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 2008

Geebelen, W. & Hoffmann, M. 2001. **Evaluation of bio-indication methods using epiphytes by correlating with SO<sub>2</sub> pollution parameters.** The Lichenologist 33.

Gries, G. **Lichens as indicators of air pollution.** Lichen Biology. Cambridge University Press, Cambridge, p. 240-254, 1996.

HALE, Jr. M. E. **The Biology of Lichens.** 3rd. ed. Baltimore, Edward Arnold, 190 p, 1983.

HAWKSWORTH DL, ROSE F. **Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens.** Nature. 1970.

HAWKSWORTH, D. L. et al. 1995. **Ainsworth & Bisby's dictionary of the fungi.** 8.ed. Oxon, UK, CAB International, 650p. illust.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Informações estatísticas – Cidades: Caçapava do Sul.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cacapava-do-sul/panorama>>.

IBRAM. **Informações sobre a economia mineral brasileira.** Instituto Brasileiro de Mineração. 2015. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/07/Economia-Mineral-Brasileira.pdf>>

KÄFFER, M. I. **Biomonitoramento da qualidade do ar com uso de líquens na cidade de Porto Alegre, RS.** Tese (Doutorado em Ciências com Ênfase em Ecologia), UFRGS, Porto Alegre, 2011.

KREBS, C. J. **Ecological methodology.** Addison Wesley Publishers, Menlo Park. 2 ed., 1999.

LE BLANC, F.S.C. & DE SLOOVER, J. **Relation industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal.** Canadian Journal of Botany 48: 1485-1496. 1970.

MARTINS, S. M. DE A.; KÄFFER, M. I.; LEMOS, A.. **Líquens como bioindicadores da qualidade do ar numa área de termoeletrônica, Rio Grande do Sul, Brasil.** Hoehnea, v. 35, n. 3, p. 425–433, 2008.

MENEGHINI, R. L.; PÉRICO, E.; MUSSKPOF, E. L. **Cobertura de líquens em árvores nativas seguindo um gradiente de urbanização na cidade de Estrela, RS.** Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 6, n. 2, p. 61-72. 2012

MENDES, A.; COSTA, S.; FERREIRA, J.; LEITÃO, J.; TORRES, P.; SILVEIRA, C.; RELVAS, H.; LOPES, M.; MONTEIRO, A.; ROEBELING, P.; MIRANDA, A. I.; TEIXEIRA, J. P. **Impactos da poluição atmosférica na Saúde: perspectivas do projeto FUTURAR.** Boletim Epidemiológico Observações, v.6, n.9, p.11-46-50, 2017.

OLIVEIRA, K. G. M. & BERETTA, M. **A Contribuição do Licenciamento Ambiental na Gestão da Qualidade do Ar: Estudo de Caso no Município de Candeias-BA.** Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais - GESTA, p. 105-121, 2014.

Palmqvist, K. **Photosynthetic CO<sub>2</sub> use efficiency in lichens and their isolated photobionts: the possible role of a CO<sub>2</sub> concentrating mechanism in cyanobacterial lichens.** *Planta*, 191, p. 48–56, 1993.

PMSB. **Plano municipal de saneamento básico de Caçapava do Sul.** Prefeitura de Caçapava do Sul. 2013. Disponível em:  
<[http://prefeitura.cacapava.net/arquivos/smb/p\\_saneamento\\_basico.pdf](http://prefeitura.cacapava.net/arquivos/smb/p_saneamento_basico.pdf)>.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal.** 7a ed. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

**Resolução CONAMA Nº 001-A, de 23/01/1986.** Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

SANTOS, R. K. et. al. **Líquens utilizados como bioindicadores da qualidade do ar do município minerador de Itabira.** *Research, Society and Development*, v. 7, n. 12, p. 01-18, e4712480, 2018.

SILVA, M. L DA.; ANDRADE, C.K. **Os impactos da atividade mineradora.** Caderno meio ambiente e sustentabilidade. v.11, 2017.

SPIELMANN A.A. **Checklist of lichens and lichenicolous fungi of Rio Grande do Sul (Brazil),** *Caderno de Pesquisa, Série Biologia* 18(2): 7-25, 2007.

SPIELMANN, A. A. **Fungos liquenizados.** Instituto de Botânica – Ibt, São Paulo, 2006.

SPIELMANN, A.A. & MARCELLI, M.P. **Parmeliaceae (Ascomycota liquenizados) nos barrancos e peraus da encosta da Serra Geral, Vale do rio Pardo, Rio Grande do Sul, Brasil.** I. Introdução e chave para gêneros. *Iheringia, Série Botânica* 63(1): 159-169, 2008.

TOLEDO, G. I. F. M. D.; NARDOCCI, A. C.. **Poluição veicular e saúde da população: uma revisão sobre o município de São Paulo (SP), Brasil.** *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 14, n. 3, p. 445–454, 2011.

VARGAS, L. B.; WOLFF, R. H.; SOARES, J. F. **Uso de líquens como bioindicadores no monitoramento ambiental: uma revisão.** *Revista Latino-Americana de Sustentabilidade*, v. 5, n. 3, p. 1–10, 2023.

WINK, J.G.; JOÃO, D.M.; CABETTE, L; HIRASE, D.N.; RUY, A.A.A.; VASCÃO, A.A.X. **Atuação dos líquens como bioindicadores.** *Anais do Semex*, [S. l.], n. 11, 2019.