

Qualidade do Ar em Bibliotecas: Parâmetros de Conforto e Saúde em Ambiente de Leitura

Brisa Lourenço Braga

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Orientado por

Professor Doutor Manuel Joaquim Sabença Feliciano

Professora Doutora Ermelinda Lopes Pereira

Professora Doutora Fabiana da Conceição Pereira Tiago

**Bragança
2025**

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa uma conquista tanto profissional quanto pessoal. Ela marca a superação de inúmeros desafios, de noites em claro e de momentos de dúvida. Durante essa jornada, muitas pessoas estiveram ao meu lado, e não poderia deixar de expressar minha gratidão a cada uma delas.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar, mesmo nos momentos em que me senti perdida ou desanimada. Foi Ele quem me concedeu resiliência diante das incertezas, sabedoria para tomar decisões difíceis e serenidade para seguir em frente.

À minha família, meu alicerce, que sempre me incentivou e acreditou em mim. Em especial, aos meus pais, Giuliano e Silvania, por serem meus exemplos e por todo o amor, apoio e carinho. À minha irmã, Lira, pelo companheirismo, amor e presença constante em minha vida. O apoio de vocês foi essencial em todos os momentos.

Aos meus orientadores, Manuel Feliciano, Ermelinda Pereira e Fabiana Tiago, minha mais profunda gratidão. Obrigada por me acolherem, por acreditarem no meu potencial e por caminharem comigo com paciência, generosidade e compromisso. O conhecimento que compartilham, o respeito pelo processo de aprendizagem e a atenção às minhas dúvidas fizeram toda a diferença. Agradeço também à professora Paula Baptista e às doutorandas Helgeneusa Costa e Susana Capitão, pelo auxílio imprescindível nas análises de DNA. Muito obrigada pelo suporte e paciência.

Aos funcionários do Serviço de Documentação e Bibliotecas do IPB, do Setor de Obras da ESA e do Setor de Manutenção e Conservação da ESA, deixo também meus sinceros agradecimentos pela paciência, disponibilidade e auxílio prestados durante todo o período de investigação. As conversas e o suporte foram fundamentais para a compreensão e o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos no Brasil, minha gratidão por permanecerem ao meu lado, mesmo com a distância física. Em especial, agradeço a Bárbara e Ana Teresa. Nossa amizade resistiu ao tempo e ao espaço, mostrando-se ainda mais forte e valiosa nos momentos em que mais precisei. Mesmo longe, vocês me ofereceram palavras de incentivo, escuta atenta, conselhos sinceros e um afeto que me aquecia nos dias mais difíceis.

Aos meus amigos do além-mar, meu mais profundo agradecimento. O intercâmbio é uma experiência desafiadora, estar longe de casa, em uma cultura diferente, aprendendo a se adaptar e a crescer em meio às incertezas. E, ainda assim, foi nesse contexto de vulnerabilidade e descoberta que encontrei pessoas incríveis, que tornaram minha vivência não apenas possível, mas extraordinária. A vocês, Filipe, Lê Campos, Jânio, Lari, Caio, Gabriel, San, Antônio, Ari, Matheus, Lucas, Júlia e Ana obrigada por todos os momentos partilhados: pelas conversas que aliviaram a saudade, pelas risadas que aqueceram dias difíceis, pelos silêncios confortáveis e pelo apoio constante.

À Lê, Maju, Karol, Bia e Taís, mesmo longe de casa, vocês se tornaram o meu lar em Bragança. Estiveram presentes nos momentos felizes e nos difíceis, sempre me apoiando e oferecendo conselhos certos. Vocês me fizeram sentir em casa, mesmo tão longe. Obrigada por serem meu espaço de conforto e acolhimento.

Também não poderia deixar de agradecer àqueles que infelizmente partiram antes desta conquista. Em especial, à minha avó Inês e aos meus tios, José Maurício e Weslei. Espero que, onde estiverem, possam sentir minha eterna gratidão por terem feito parte da minha vida.

Às instituições que tornaram esta etapa da minha vida possível, o CEFET-MG e o IPB deixo minha sincera gratidão. Ao CEFET-MG, agradeço pela sólida formação acadêmica que me proporcionou, pelos professores inspiradores e pela base que me preparou para enfrentar novos desafios. Ao IPB, agradeço pela acolhida generosa, pela estrutura de excelência e pelas oportunidades que enriqueceram minha formação científica e pessoal.

Nesse sentido, agradeço também aos professores Bráulio Chaves e Cláudia França, do CEFET-MG, por terem sido fundamentais nos meus primeiros passos no desenvolvimento de trabalhos científicos. Agradeço por tudo o que me ensinaram sobre o processo de produção científica e por me ajudarem a construir uma visão crítica sobre a ciência e os seus desdobramentos.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento.

Resumo

A Qualidade do Ar Interior (QAI) tem-se consolidado como uma ferramenta fundamental para a promoção da saúde pública e a preservação patrimonial, especialmente em espaços de uso coletivo e com acervos sensíveis, como as bibliotecas. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar a Qualidade do Ar Interior (QAI) da biblioteca da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, com base na monitorização de parâmetros físico-químicos e microbiológicos durante o outono, inverno e primavera. Foram também avaliados os fatores que influenciam a QAI e a conformidade com a legislação portuguesa.

Foram analisados indicadores de conforto térmico, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa (HR), bem como poluentes físico-químicos e microbiológicos, tais como material particulado (PM₁₀ e PM_{2,5}), dióxido de carbono (CO₂), formaldeído (CH₂O), compostos orgânicos voláteis (COVs), monóxido de carbono (CO) e poluentes microbiológicos (fungos e bactérias).

Os resultados revelaram variações sazonais e espaciais relevantes. A humidade relativa (HR) manteve-se abaixo dos níveis recomendados (23,5 a 39,4%), representando riscos à saúde dos ocupantes e à preservação do acervo documental. As temperaturas estiveram frequentemente fora da faixa ideal, especialmente em zonas não climatizadas. Parâmetros físico-químicos encontraram-se dentro dos limites legais, apesar dos picos de COVs associados ao uso de álcool 70% durante as medições microbiológicas.

Quanto aos poluentes microbiológicos, foram identificados 17 géneros de fungos, com predominância de *Cladosporium*, *Penicillium* e *Aspergillus*. A razão Interior/Exterior (I/E) indicou que a origem desses fungos foi predominantemente externa (I/E < 1). A presença desses géneros é preocupante tanto para a saúde dos ocupantes quanto para a preservação do acervo. Nenhuma bactéria foi observada, o que pode ser atribuído à baixa humidade relativa que pode ter afetado a sua viabilidade.

A caracterização evidenciou pontos críticos relacionados à HR e temperatura, agravados pelo funcionamento intermitente da UTA e pela falta de monitorização destes parâmetros. Recomenda-se a implementação de um sistema integrado de controlo e monitorização ambiental e o uso de humidificadores.

Palavras-chave: Qualidade do ar interior, Conforto Térmico, Poluente físico-químicos, Poluentes microbiológicos, Bibliotecas Universitárias.

Abstract

Indoor Air Quality (IAQ) has established itself as a fundamental tool for promoting public health and heritage preservation, especially in public spaces and those with sensitive collections, such as libraries. Therefore, this study aimed to characterize the Indoor Air Quality (IAQ) of the library of the Escola Superior Agrária of the Polytechnic Institute of Bragança, by monitoring physical, chemical, and microbiological parameters during the fall, winter, and spring. Factors influencing IAQ and compliance with Portuguese legislation were also assessed.

Indicators of thermal comfort, namely temperature and relative humidity (RH), as well as physical, chemical, and microbiological pollutants, such as particulate matter (PM10 and PM2.5), carbon dioxide (CO₂), formaldehyde (CH₂O), volatile organic compounds (VOCs), carbon monoxide (CO), and microbiological pollutants (fungi and bacteria), were analyzed.

The results revealed significant seasonal and spatial variations. Relative humidity (RH) remained below recommended levels (23.5 to 39.4%), posing risks to the health of occupants and the preservation of the documentary collection. Temperatures were frequently outside the ideal range, especially in non-climate-controlled areas. Physicochemical parameters were found within legal limits, despite peaks in VOCs associated with the use of 70% alcohol during microbiological measurements.

Regarding microbiological pollutants, 17 fungal genera were identified, with *Cladosporium*, *Penicillium*, and *Aspergillus* predominating. The Indoor/Outdoor (I/E) ratio indicated that these fungi originated predominantly from the outside (I/E < 1). The presence of these genera is a concern for both the health of occupants and the preservation of the collection. No bacteria were observed, which can be attributed to the low relative humidity, which may have affected their viability.

The characterization revealed critical points related to RH and temperature, exacerbated by the intermittent operation of the ATU and the lack of monitoring of these parameters. It is recommended to implement an integrated environmental control and monitoring system and the use of humidifiers.

Keywords: Indoor air quality, Thermal comfort, Physicochemical pollutant, Microbiological pollutants, Universities libraries.

Índice Geral

Agradecimentos.....	ii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice Geral	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas.....	xiii
Unidades de medida	xiv
1. Introdução.....	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Estrutura da Tese	16
2. Referencial teórico	17
2.1 Qualidade do ar: definições e conceitos básicos	17
2.2 Ventilação e interfaces entre o ar exterior e o interior	18
2.3 Conforto térmico	19
2.3.1 Temperatura do ar.....	20
2.3.2 Humidade Relativa	21
2.4 Poluentes do ar interior e impactos em bibliotecas	23
2.4.1 Radão	24
2.4.2 Monóxido de Carbono	25
2.4.3 Dióxido de Carbono.....	26
2.4.4 Compostos orgânicos voláteis	27
2.4.5 Formaldeído	29
2.4.6 Material Particulado.....	31
2.4.7 Poluentes microbiológicos.....	34
3. Metodologia	39

3.1 Local de Estudo.....	39
3.2 Pontos de amostragem	41
3.2.1 Depósito de livros.....	42
3.2.2 Sala de leitura I	43
3.2.3 Sala de leitura II	44
3.2.4 Gabinete I.....	44
3.3 Levantamento de dados da área de estudo.....	44
3.4 Monitorização dos parâmetros físico-químicos.....	45
3.4.1 Equipamentos utilizados	46
3.4.2 Levantamento de informações sobre as condições de medição.....	47
3.4.3 Avaliação das condições meteorológicas	47
3.5 Monitorização dos parâmetros microbiológicos	48
3.5.1 Equipamentos para a monitorização de parâmetros microbiológicos	48
3.5.2 Caracterização microbiológica	49
3.6 Tratamento dos dados	51
3.6.1 Pré processamento dos dados	51
3.6.2 Processamento dos dados.....	52
3.6.3 Cálculo da razão interior-exterior	52
3.6.4 Cálculo da ventilação	52
3.6.5 Avaliação do conforto térmico	53
3.6.6 Cálculo da diversidade microbiológica	54
3.7 Avaliação da conformidade legal	54
3.7.1 Poluentes físico-químicos	54
3.7.2 Poluentes microbiológicos.....	55
4. Resultados e discussão	56
4.1 Avaliação da ventilação.....	57
4.2 Parâmetros de conforto térmico	58
4.2.1 Temperatura do ar.....	60
4.2.2 Humidade do ar.....	61
4.2.3 Avaliação do conforto térmico	64

4.3 Poluentes gasosos	66
4.3.1 Monóxido de Carbono	67
4.3.2 Dióxido de Carbono	69
4.3.3 Compostos orgânicos voláteis	72
4.3.4 Formaldeído	75
4.3.5 Avaliação da conformidade legal	77
4.4 Material Particulado.....	78
4.4.1 Variabilidade sazonal e espacial do Material Particulado.....	82
4.4.2 Conformidade legal de Material Particulado	83
4.5 Parâmetros microbiológicos	84
4.5.1 Fungos.....	84
4.5.2 Bactérias.....	91
4.6 Avaliação da correlação entre os parâmetros.....	92
Considerações finais	93
Referencias bibliográficas	96
Anexo A Questionário de caracterização das condições no momento da amostragem	102
Anexo B Tabela de conversão para o número mais provável de colónias.....	104
Anexo C Resultado do teste de DCSF para os parâmetros monitorizados.....	105
Anexo D Resultados do sequenciamento de fungos e código de acesso na plataforma BLAST. 110	
Anexo E Contagem total de géneros fúngicos (UFC/m ³) por pontos de amostragem coletados pela manhã 111	
Anexo F Contagem total de UFC de géneros fúngicos por pontos de amostragem coletados pela tarde 113	

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema representativo dos principais fatores que afetam a qualidade do ar em espaços fechados	18
Figura 2 Esquema representativo dos principais processos e mecanismos que influenciam as dinâmicas de PM _x em ambientes interiores, de acordo com NASEM (2024).	32
Figura 3 Localização do local de estudo	39
Figura 4 Planta da Biblioteca da ESA	40
Figura 5 Esquema da localização dos pontos de amostragem	42
Figura 6 Localização da Estação Meteorológica da ESA	47
Figura 7 Cólônias de fungos isoladas	49
Figura 8 Resultado do PCR em gel de agarose 1%	51
Figura 9 Diagrama de conforto térmico disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia ...	54
Figura 10 Variação temporal da temperatura com indicação dos momentos de ligação e fecho do sistema de climatização (campanha de primavera).....	60
Figura 11 Valores médios sazonais de temperatura por ponto de amostragem	61
Figura 12 Variação temporal da humidade relativa com indicação dos momentos de ligação e fecho do sistema de climatização (campanha de primavera).....	62
Figura 13 Valores médios sazonais de humidade relativa por ponto de amostragem	63
Figura 14 Resultado da avaliação de conforto térmico a partir do Diagrama de conforto térmico disponibilizado pelo INMET (2019)	65
Figura 15 Concentrações médias sazonais de monóxido de carbono por ponto de amostragem..	68
Figura 16 Variações sazonais da razão I/E de monóxido de carbono por ponto de amostragem durante as estações do ano	68
Figura 17 Concentrações médias sazonais de dióxido de carbono por ponto de amostragem.....	69
Figura 18 Variação temporal do dióxido de carbono com indicação dos momentos de abertura e encerramento da biblioteca (campanha de primavera).....	71
Figura 19 Variações sazonais da razão I/E de dióxido de carbono por ponto de amostragem durante as estações do ano	71
Figura 20 Concentrações médias sazonais de compostos orgânicos voláteis por ponto de amostragem.....	73
Figura 21 Variações diária da concentração de COVs com indicação dos momentos de abertura, encerramento da biblioteca e medições microbiológicas	73

Figura 22 Razão I/E do COVs.....	74
Figura 23 Concentração média sazonal do formaldeído por ponto de amostragem.....	75
Figura 24 Variações sazonais da razão I/E de formaldeído por ponto de amostragem durante as estações do ano estudadas	76
Figura 25 Concentrações médias de CO e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	77
Figura 26 Concentrações médias de CO ₂ e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	78
Figura 27 Concentrações médias de COVs e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	78
Figura 28 Concentrações médias de CH ₂ O e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	78
Figura 29 Variação temporal da concentração de PM _{2,5} com indicação dos momentos de limpeza e ligação/fecho do sistema de climatização (campanha de primavera)	80
Figura 30 Variação temporal da concentração de PM ₁₀ com indicação dos momentos de limpeza e ligação do sistema de climatização (campanha de primavera)	80
Figura 31 Variações sazonais da razão I/E de PM ₁₀ e PM _{2,5} por ponto de amostragem durante as estações do ano	81
Figura 32 Variações sazonais da razão I/E de Material Particulado por ponto de amostragem durante as estações do ano	82
Figura 33 Concentrações médias de PM _{2,5} e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	83
Figura 34 Concentrações médias de PM ₁₀ e limiar de proteção estabelecido pela Portaria nº138-G/2021.....	84
Figura 35 Concentrações médias de fungos (UFC /m ³) no período da manhã nos pontos de amostragem durante o estudo.	87
Figura 36 Concentrações médias de fungos (UFC/m ³) no período da tarde nos pontos de amostragem durante o estudo.	87
Figura 37 Razão I/E de concentrações de fungos por ponto de amostragem durante as estações do ano.....	88
Figura 38 Frequência relativa de géneros de fungos identificados pela manhã em cada ponto de amostragem durante o estudo	89
Figura 39 Frequência relativa de géneros de fungos identificados pela tarde em cada ponto de amostragem durante o estudo	90

Índice de Tabelas

Tabela 1 Faixas de humidade relativas e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes e ambiente	22
Tabela 2 Correlação entre faixas de Humidade Relativa e os efeitos sobre o acervo	23
Tabela 3 Poluentes físico-químico descritos pela bibliografia técnica.....	24
Tabela 4 Concentrações de CO e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes de acordo com US EPA (2025a).....	25
Tabela 5 Concentrações máximas de CO por tempo de exposição.....	26
Tabela 6 COVs normalmente encontrados e as suas principais fontes.	27
Tabela 7 COVs e sintomas graves observados após exposição, de acordo com David & Niculescu (2021)	28
Tabela 8 COVs e seus principais impactos sobre acervo	29
Tabela 9 Concentrações de Formaldeído e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes	30
Tabela 10 Categorização dos PMx por tamanho e seu grau de penetração no sistema respiratório	31
Tabela 11 Composição e efeitos do material particulado na preservação de acervos	33
Tabela 12 Presença fúngica descritas em bibliotecas, museus, repositórios e arquivos	36
Tabela 13 Presença bacteriana descritas em bibliotecas, museus, repositórios e arquivos	38
Tabela 14 Caracterização dos compartimentos selecionados	41
Tabela 15 Princípio de medição, faixas de medição e precisão do Handheld PC-3016A.....	46
Tabela 16 Princípio de medição, faixa de medição e precisão do Direct Sense XM	46
Tabela 17 Faixas de Temperatura e HR registadas no exterior	48
Tabela 18 Componentes e volumes utilizados para a reação de PCR de μL	50
Tabela 19 Limiar de proteção e margem de tolerância para poluentes físico-químicos	55
Tabela 20 Condições de referência para poluentes microbiológicos	55
Tabela 21 Condições específicas para a verificação da conformidade de fungos com base na perigosidade das diferentes espécies	56
Tabela 22 Taxa média de ventilação observada nos pontos de amostragem	57
Tabela 23 Taxa média de renovação do ar observadas nos pontos de amostragem.....	58
Tabela 24 Temperatura e HR do ar nos diferentes pontos de amostragem	59
Tabela 25 Poluentes gasosos do ar nos diferentes pontos de amostragem durante as estações do ano.....	66

Tabela 26 Material Particulado do ar nos diferentes pontos de amostragem durante as estações do ano.....	79
Tabela 27 Concentração de fungos (UFC/m ³) no ar nos pontos de amostragem durante as estações do ano.....	85
Tabela 28 Índice de diversidade de Simpson (1-D).....	90
Tabela 29 Matriz de correlação de Spearman	93

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ALA	American Library Association
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CH₂O	Formaldeído
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
ESA	Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança
HR	Humidade Relativa do Ar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia - Brasil
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IQAI	Índice de Qualidade do Ar Interior
NASEM	National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine
PM_x	Material Particulado de diâmetro aerodinâmico de corte de x µm
PM₁₀	Material particulado de diâmetro aerodinâmico de corte de 10 µm
PM_{2,5}	Material particulado de diâmetro aerodinâmico de corte de 2,5 µm
PM_{0,1}	Material particulado de diâmetro aerodinâmico de corte de 0,1 µm
PTS	Partículas Totais em Suspensão
QAI	Qualidade do Ar Interior
Ra	Rádio
Rn	Radão
US EPA	United States Environmental Protection Agency
U	Urânio

Unidades de medida

Bq/m³	Becquerel por metro cúbico
°C	Graus Celsius
L/s por pessoa	Litro por segundo por pessoa
m	Metro
m²	Metro Quadrado
m³	Metro Cúbico
µm	Micrómetro
µM	Micromole
µg/L	Micrograma por litro
µg/m³	Micrograma por metro cúbico
mg/m³	Miligrama por metro cúbico
ppb	Partes por bilião (partes por bilhão, variante português do brasil)
ppm	Partes por milhão
%	Porcentagem
UFC/m³	Unidade Formadora de Colónias por metro cúbico

1. Introdução

1.1 Contextualização

As últimas décadas foram marcadas pela consolidação da Qualidade do Ar Interior (QAI) como área de interesse, sendo impulsionada pelos avanços das ciências ambientais e pelo aumento das preocupações com a saúde pública, especialmente em um contexto pós pandemia de COVID-19 (Jones, 1999; Agarwal et al 2021). Estima-se que as pessoas passem entre 80% e 90% do tempo em ambientes fechados, diante disso o estudo e a avaliação das condições ambientais deste tipo de espaço é fundamental para a promoção da qualidade de vida e do bem-estar da população.

A exposição prolongada a ambientes internos com má qualidade do ar está associada a impactos diretos sobre a saúde, conforto e a produtividade das pessoas. Sendo comumente observados nestas situações sintomas como fadiga, alergias, dores de cabeça e dificuldade de concentração (US EPA, 2025). Assim, os espaços académicos, como salas de aula, laboratórios e bibliotecas, tornam-se espaços importantes para a avaliação da QAI, uma vez que possuem papel indispensável na formação intelectual e profissional.

As bibliotecas são estruturas centrais dentro das instituições de ensino superior. Mais do que repositórios de informações, são espaços dinâmicos de aprendizagem, socialização e produção de conhecimento, auxiliando no desenvolvimento de atividades individuais e coletivas ao integrar recursos e tecnologias fundamentais no contexto académico contemporâneo (Nunes & Carvalho, 2016; Amante, 2010). A associação entre as múltiplas funções desempenhadas pelas bibliotecas com a diversidade de ocupantes, desde a comunidade académica até visitantes ocasionais, e a permanência muitas vezes prolongadas tornam esses espaços vulneráveis a questões relacionadas ao conforto e a saúde dos usuários.

Embora o conforto térmico e a ergonomia sejam características desejadas nestes espaços, os parâmetros físicos-químicos e microbiológicos do ar nem sempre são monitorizados de forma sistemática. Juntamente com essa falta de controlo de parâmetros ambientais, a presença de acervos antigos, o uso de determinados tipos de materiais na construção e nos mobiliários, a ventilação ineficiente, principalmente em edifícios antigos ou com climatização artificial, e a elevada densidade ocupacional em horários de pico podem favorecer o acúmulo de poluentes, e conseqüentemente piorar a qualidade do ar.

Além das questões relacionadas à saúde e ao bem-estar dos utilizadores, a qualidade do ar pode influenciar a conservação do acervo, especialmente os documentos sensíveis (Tétreault, 2021). Os danos mais comuns observados nas coleções são alterações de coloração, aumento da fragilidade a danos mecânicos (como rachaduras, cortes e rasgos), proliferação de microrganismos e ataques biológicos (Adcock et al., 1999).

A partir do somatório destas características as bibliotecas universitárias tornam-se particularmente interessantes do ponto de vista dos estudos sobre QAI e seus impactos sobre a saúde

dos ocupantes e a preservação do patrimônio. Apesar disso, as investigações sobre as bibliotecas continuam escassas, especialmente no contexto da literatura lusófona. No âmbito da QAI nota-se uma concentração de estudos em ambientes como escolas, hospitais, habitações e edifícios corporativos (Carrer & Wolkoff, 2018; Sundell et al., 2011).

Diante deste panorama, a caracterização da qualidade do ar em bibliotecas passa a ser um instrumento importante para a promoção da saúde e do bem-estar dos utilizadores, bem como para a preservação do acervo, uma vez que pode mapear os principais problemas observados nestes espaços e orientar ações corretivas e preventivas.

1.2 Objetivos

O objetivo central do presente trabalho é caracterizar a qualidade do ar interior da biblioteca da Escola Superior Agrária (ESA) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), a partir de análises de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, durante o outono, o inverno e a primavera. Procurando alcançar esse resultado, foram traçados cinco objetivos específicos:

- Avaliar as condições de conforto térmico da biblioteca da ESA, a partir da medição da humidade relativa (HR) e da temperatura do ar;
- Mensurar a concentração de poluentes físico-químicos do ar interior, sendo analisadas as concentrações de Material Particulado, Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), Dióxido de Carbono (CO₂), Formaldeído (CH₂O) e Monóxido de Carbono (CO).
- Mensurar a concentração de poluentes microbiológicos, designadamente bactérias e fungos.
- Procurar identificar os fatores determinantes da qualidade do ar interior do espaço referido, através do estabelecimento de relações entre os níveis de contaminantes e as suas principais fontes, assim como as taxas de ventilação.
- Comparar os resultados observados com os valores de referência descritos pela legislação portuguesa.

1.3 Estrutura da Tese

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução: apresenta o contexto geral da pesquisa, a justificativa do estudo, a relevância do tema, os objetivos propostos e a estrutura organizacional da tese.
- Capítulo 2 – Fundamentos teóricos: expõe os principais fundamentos teóricos que sustentam o trabalho, com ênfase nos conceitos de Qualidade do Ar Interior (QAI) e nos principais poluentes presentes em ambientes interior e seus riscos associados à saúde dos ocupantes e à preservação do acervo. Além disso, esse capítulo também discute os principais desafios da QAI em bibliotecas universitárias.
- Capítulo 3 - Metodologia: detalha os procedimentos adotados para a realização das análises, incluindo o local de estudo, o delineamento da pesquisa, os métodos de tratamento dos dados, os equipamentos utilizados e os critérios de análise.

-
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os resultados obtidos e discute as principais correlações entre os parâmetros avaliados, os pontos críticos identificados, assim como a comparações com os limites estabelecidos previstos pela legislação portuguesa.
 - Capítulo 5 - Considerações Finais: reúne as principais conclusões do trabalho apresentando as contribuições do estudo, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2. Referencial teórico

Neste capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos que sustentam a tese. Consiste em uma revisão de literatura sobre Qualidade do Ar Interior em bibliotecas universitárias, focada na sua influência sobre a saúde dos utilizadores e a conservação do acervo. O objetivo é compreender o comportamento dos poluentes e dos parâmetros de conforto em ambientes internos, assim como seus impactos. A fim de sistematizar a apresentação das informações esta secção foi dividida em cinco partes: Qualidade do Ar Interior: definições e conceitos básicos; Conforto térmico; Ventilação e interfaces entre o ar exterior e o interior; Poluentes químicos e físico; e Poluentes microbiológicos.

A revisão de literatura tem início na apresentação de conceitos básicos da Qualidade do Ar Interior, tendo destaque a apresentação do campo de estudo, sua abrangência e os principais fatores estudados. Na sequência, a discussão aborda a ventilação e sua influência nas dinâmicas do ar interior. O tópico seguinte aprofunda sobre os parâmetros de conforto, com destaque para seus impactos no bem-estar dos utilizadores e na integridade do acervo. Por fim, são discutidos os comportamentos e os impactos dos poluentes estudados por essa pesquisa no bem-estar dos frequentadores e seus impactos sobre a degradação de materiais.

2.1 Qualidade do ar: definições e conceitos básicos

A Qualidade do Ar Interior (QAI) é uma área de estudo que se debruça sobre as condições do ar em ambientes fechados, especialmente no que diz respeito a níveis de ventilação, conforto térmico e presença de poluentes. Os parâmetros físicos, químicos e biológicos avaliados pela QAI impactam diretamente na saúde, no bem-estar e na produtividade dos ocupantes (Aziz et al., 2023; Güneş et al., 2022).

Este é um campo de estudo essencialmente interdisciplinar, que relaciona as áreas da Ciências Ambientais, a Engenharia e Arquitetura e as Ciências da Saúde (Sadrizadeh et al., 2022). Neste sentido, as áreas das Ciências Ambientais concentram-se no comportamento dos contaminantes no ar. A Arquitetura e a Engenharia avaliam as influências do design da edificação nas características do ar. E a Ciências da Saúde analisam os efeitos da exposição à má qualidade do ar sobre o organismo humano.

As características do ar em ambientes fechados são resultados da influência de diversos fatores físicos e funcionais (Figura I).

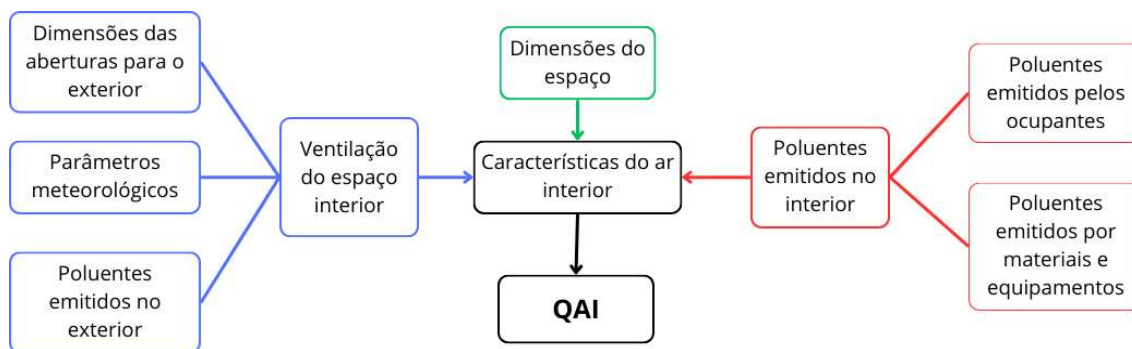


Figura 1 Esquema representativo dos principais fatores que afetam a qualidade do ar em espaços fechados

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2013)

2.2 Ventilação e interfaces entre o ar exterior e o interior

O ar interior geralmente apresenta uma concentração de poluentes superior à do ar exterior, devido à emissão de substâncias poluentes dentro das edificações e à baixa taxa de ventilação (Sun et al., 2019). A ventilação, definida como o processo de fornecimento ou remoção de ar num espaço fechado, pode ocorrer por meios naturais ou mecânicos (Wu e Wang, 2005). Esse processo é essencial para a diluição dos poluentes no interior, reduzindo-os a níveis menos prejudiciais à saúde e promovendo o conforto dos ocupantes (Persily, 2015).

De acordo com Wu e Wang (2005), a ocupação humana em ambientes com ventilação inadequada ou ausente causa cinco principais efeitos: diminuição da concentração de oxigênio no ar; aumento da produção de dióxido de carbono; libertação de compostos orgânicos associados a odores corporais e a vestuário; aumento da humidade devido à evapotranspiração; e elevação da temperatura do ambiente, decorrente de processos corporais.

Existem três tipos principais de ventilação: infiltração, ventilação natural e ventilação mecânica (US EPA, 2025). A infiltração é um processo involuntário que ocorre por meio de pequenas aberturas, como juntas, rachaduras e frestas na estrutura da edificação. Embora ocorra na maioria dos edifícios, a infiltração é incontrollável e depende de variações de pressão, provocadas pelo vento, diferenças de temperatura entre os ambientes interno e externo e desequilíbrios entre os sistemas de exaustão e ventilação (Etheridge & Sandberg, 1996).

A ventilação natural, por sua vez, ocorre através da abertura de janelas ou portas, permitindo a livre passagem do ar. Nesse tipo de ventilação, dois fenômenos principais movem o ar: o gradiente de pressão causado pelo vento e o gradiente de temperatura (Li, 2023).

E por fim, a ventilação mecânica ocorre por meio da utilização de sistemas forçados, os quais são responsáveis por promover a renovação do ar interior, garantindo a extração de poluentes e a introdução controlada de ar exterior (US EPA, 2025). Esses sistemas podem incluir ventiladores, exaustores e unidades de tratamento de ar (UTA), que são amplamente utilizados para assegurar níveis adequados de salubridade e conforto ambiental (Persily, 2015).

A avaliação da qualidade da ventilação, ocorre por meio de dois parâmetros principais: a taxa de ventilação e a taxa de renovação do ar. A taxa de ventilação mensura o caudal de ar fresco introduzida na edificação durante um período para a quantidade de ocupantes, De acordo com a norma EN 16798-1/2019 e WHO (2021) estabelecem que o caudal mínimo de ventilação deve ser de 10L/s por pessoa.

A taxa de renovação do ar quantifica frequência com que o ar de um ambiente interior é trocado. Embora não seja um parâmetro presente em normas como a taxa de ventilação, esse parâmetro auxilia na compreensão das dinâmicas de poluentes em ambientes internos. A definição de uma faixa ideal para a taxa de renovação do ar para ambientes como museus, bibliotecas e arquivos é um desafio, uma vez que essa necessidade pode ser influenciada por diversos fatores e características do acervo (ASHRAE, 2019). Thickett et al. (2007) investigou cinco bibliotecas e arquivos arqueológicos no Reino Unido, os autores observaram taxas de renovação do ar entre $0,27h^{-1}$ e $0,93h^{-1}$ nas bibliotecas, e entre $0,08h^{-1}$ e $0,13h^{-1}$ nos arquivos.

De acordo com ASHRAE (2019) normalmente espaços como arquivos e depósitos de coleções apresentam taxas de renovação do ar mais baixas quando comparados com espaços das edificações destinados ao trânsito de pessoas, isso ocorre para a garantia de controle de condições ambientais (temperatura, humidade relativa, luminosidade). Ainda de acordo com a organização, exceções a essa regra podem ser observadas quando tratamos de coleções com características distintas como alta taxa de emissões de poluentes. Neste sentido, Ryhl-Svendson (2007) afirma que apesar da renovação do ar ter um papel importante para a diluição de poluentes, o aumento desta taxa pode indicar o aumento da introdução de poluentes emitidos no exterior.

2.3 Conforto térmico

O conforto térmico é definido como o estado de satisfação dos indivíduos em relação ao ambiente térmico ao seu redor (ISO 7730/2005). A avaliação desse conforto considera uma série de parâmetros ambientais, como temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante, além de fatores fisiológicos e comportamentais dos ocupantes, tais como taxa metabólica, tipo de vestuário, aclimação e condição física (Sadrizadeh et al., 2021; Cândido et al., 2024). Assim, a avaliação do conforto térmico é uma tarefa complexa que depende de variáveis objetivas e subjetivas.

De acordo com Miguel (2007), seis condições fisiológicas precisam ser atendidas simultaneamente para que o conforto térmico seja efetivamente percebido: equilíbrio térmico, ausência de arrepios, carga ideal de transpiração, temperatura média da pele ideal, pele relativamente seca e ausência de secura nas mucosas.

Para além do bem-estar e da saúde humana, a condição de conforto térmico tem grande influência sobre os processos de preservação e degradação de acervos bibliográficos. Parâmetros como temperatura e humidade relativa do ar podem acelerar a degradação química, física e microbiológica do acervo (Brown et al., 2002; Adcock et al., 1999). Nesse contexto, um dos principais desafios está em garantir ambientes termicamente confortáveis para os ocupantes, que simultaneamente atendam às exigências de conservação dos materiais.

Nesta pesquisa, o conforto térmico é analisado com foco na temperatura do ar e na humidade relativa, devido aos seus impactos no bem-estar dos usuários e na conservação do acervo documental.

2.3.1 Temperatura do ar

A temperatura é um parâmetro físico que pode ser compreendido sob diferentes perspectivas, de acordo com o que pretende-se estudar. De forma geral, a temperatura é definida como a medida do nível de agitação das partículas. Assim, quanto maior a agitação molecular, maior será a temperatura.

No que diz respeito à saúde humana, a exposição prolongada a ambientes com temperaturas baixas ou muito elevadas está relacionada a sintomas como fadiga, ansiedade, dores de cabeça, dificuldades de concentração e outros efeitos adversos (Souza, 2023). Assim, a ocorrência desse tipo de problema torna-se especialmente relevante em contexto laborais e educacionais, em que o desempenho cognitivo é necessário.

Diversos estudos realizados em salas de aula demonstram a relação entre a temperatura do ambiente e o desempenho dos alunos em tarefas escolares e testes psicológicos. Wargocki et al. (2019) analisou 18 estudos conduzidos em escolas em regiões de clima temperado, sendo observado que a redução da temperatura de 30°C para 20°C resultou em um aumento de aproximadamente 20% no desempenho de atividades escolares. Além disso, o estudo também afirma que a temperatura ideal para o desempenho acadêmico se situa abaixo de 22°C.

Resultados similares foram observados por Lucas et al. (2024) ao constatar que estudantes submetidos a testes em faixa de temperatura entre 22°C e 24°C tiveram probabilidade 74,2% maiores de alcançar melhores resultados em comparação com outras faixas de temperaturas. De forma semelhante, Pereira et al. (2020) analisou a performance cognitiva de estudantes sob três condições térmicas distintas (20,07 °C, 33,7 °C e 22,94 °C), concluindo que as melhores respostas cognitivas ocorreram à temperatura de 22,94 °C. Diante deste cenário, a temperatura considerada ideal para a otimização de funções cognitivas em ambientes escolares encontra-se próxima a 22°C.

Em relação à conservação dos acervos bibliográficos e documentais, a temperatura desempenha um importante papel, sendo diretamente relacionada com processos físicos, químicos e biológicos que influenciam a durabilidade das coleções. Brown et al. (2002) e Adcock et al. (1999) indicam que um aumento de 10 °C na temperatura pode duplicar a taxa de reações químicas, enquanto uma redução da mesma magnitude tende a diminuir essas reações para metade. Além disso, variações bruscas de temperatura em curtos períodos podem causar danos estruturais irreversíveis, ao enfraquecerem a integridade dos materiais (Brown et al., 2002). Isso ocorre devido aos efeitos de expansão e contração que a temperatura tem sobre os materiais.

O controlo da temperatura é também um fator crucial para o desenvolvimento microbiológico. O crescimento de microrganismos depende de diversos fatores, entre eles: a temperatura, o pH, a disponibilidade de oxigênio e a umidade (Madigan et al., 2015). De acordo com Madigan et al. (2015), os microrganismos podem ser classificados em quatro grupos, com base na sua faixa ótima de temperatura para desenvolvimento. Os psicrófilos apresentam temperatura ótima de crescimento

próxima a 15 °C, embora possam se desenvolver entre 0 °C e 20 °C. Já os mesófilos desenvolvem-se entre 15 °C e 45 °C, com temperatura ótima entre 35 °C e 39 °C. Os termófilos crescem em temperaturas que variam de 45 °C a 80 °C, com temperatura ótima em torno de 60 °C. Por fim, os hipertermófilos se desenvolvem entre 65 °C e 115 °C, com faixa ótima entre 90 °C e 110 °C. Diante desse contexto, em ambientes como bibliotecas, os principais microrganismos identificados pertencem aos grupos dos psicrófilos e mesófilos (Hayleeyesus & Manaye, 2014; Valeriani et al., 2017).

Com o intuito de associar a necessidade de preservar o acervo bibliográfico e o conforto térmico dos utilizadores diversos autores buscaram estabelecer faixas ótimas de temperaturas para ambientes de bibliotecas. Flieder e Duchein (1993) recomendam que os espaços de conservação de livros se mantenham entre os 17 °C e os 19 °C. No entanto, Rooney (1994) defende que a temperatura ideal deve estar entre os 20 °C e os 22 °C, buscando a associar a preservação do acervo com o conforto dos ocupantes. Por sua vez, Trinkley (2001) sugere que as bibliotecas podem operar com temperaturas entre os 18 °C e os 24 °C, desde que a humidade relativa seja mantida entre os 45% e os 55%.

2.3.2 Humidade Relativa

A humidade relativa do ar (HR) é definida como a razão entre a pressão parcial de vapor de água presente na atmosfera e a pressão de vapor de saturação à mesma temperatura, expressa em percentagem (Legg, 2017). Em termos práticos, indica o quão próximo o ar se encontra da sua capacidade máxima de retenção de vapor de água, sendo esta variável fortemente influenciada pela temperatura (Henderson, 2013). Neste sentido, observa-se que, em temperaturas mais altas, a humidade relativa do ar tende a ser mais baixa, uma vez que a pressão de vapor de saturação aumenta.

As preocupações relacionadas com a humidade relativa (HR) em ambientes de bibliotecas e arquivos centram-se na segurança dos ocupantes e no impacto deste parâmetro sobre os desgastes físico, químico e microbiológico das coleções. Em primeiro lugar, a HR está intimamente ligada ao bem-estar, à saúde e ao conforto dos ocupantes de espaços fechados. A HR ideal para a garantia da saúde humana geralmente varia entre 30% e 70%, dependendo dos autores consultados. A US EPA (2024) afirma que valores de HR 30% e 70% são considerados ideais para a preservação da saúde dos ocupantes de ambientes interiores. Esta visão é semelhante à apresentada pela norma ISO 7730/2005, que estabelece o mesmo intervalo para garantir o conforto e a ergonomia dos ocupantes.

Por outro lado, autores como Jones et al. (2022) e Guarnieri et al. (2023) indicam que os intervalos ideais de humidade relativa se situam entre 40% e 60%, com base na redução dos riscos de contaminações microbiológicas e químicas, além de atenderem às necessidades fisiológicas dos ocupantes.

No que diz respeito à preservação de acervos, a HR é um fator importante devido à sua influência sobre processos de degradação física, química e biológica. Do ponto de vista físico, as variações dos níveis de humidade podem causar distorções em materiais orgânicos, especialmente no papel. As exposições prolongadas a níveis de HR altos podem provocar ondulações e deformações

irreversíveis, por outro lado a permanência em HR baixas pode ser responsável por originar fendas, rachaduras e fragilidades estruturais no papel (Adcock et al., 1999). Desta forma, quando fora da faixa ideal, os materiais tornam-se mais suscetíveis a danos e desgaste acelerado.

Do ponto de vista químico, valores elevados de HR podem intensificar o processo de hidrólise, especialmente da celulose (Vibert et al., 2023). Esse fenômeno provoca a quebra das cadeias moleculares, comprometendo a integridade do papel. Além disso a HR contribui para fenômenos de oxidação e descoloração, acelerando a degradação visual e estrutural de documentos (Adcock et al., 1999). Com relação aos processos biológicos, elevados níveis de HR proporcionam ambientes propícios para o crescimento de fungos e bactérias, que podem colonizar materiais do acervo e causar danos significativos, e em muitos casos irreversíveis (Camuffo, 1998). Assim, a proliferação microbiana é um dos principais desafios para a conservação de materiais em ambientes fechados e mal climatizados.

Na Tabela 1, apresenta-se uma síntese dos principais efeitos observados na saúde e no ambiente para diferentes faixas de umidade relativa, de acordo com Guarnieri et al. (2023).

Tabela 1 Faixas de umidade relativas e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes e ambiente

Faixa de umidade relativa (%)	Efeitos sobre a saúde	Efeitos sobre o ambiente
< 30	Irritação da mucosa de olhos, gargantas e narizes; Ressecamento do trato respiratório e da pele; Exposição aos efeitos irritantes do ozônio.	Elevada formação de ozônio; Ambiente altamente propício à dispersão viral; Presença de bactérias oportunistas podem sobreviver em equipamentos de climatização
30 – 40%	Desconforto respiratório leve	Baixa proliferação de fungo e ácaros; Ambiente altamente propício à dispersão viral
40 – 60%	Boa hidratação da mucosa; Conforto térmico e biológico adequado	Redução da atividade microbiana Reduzida dispersão viral; Menor emissão de poluente químicos a partir de materiais presentes no ambiente
60 –70%	Desconforto respiratório	Risco de crescente de fungos e bactérias
70 – 80%	Riscos a saúde respiratória e oculares	Aumento da dispersão de vírus respiratórios; Crescimento de fungos em superfícies; Liberação de odores e vapores tóxicos
> 80%	Alto risco de desenvolvimento de alergias; Aumento do risco de contaminações cruzadas	Alta emissão de formaldeído e acroleína de materiais; Ambiente insalubre e inadequado para longas permanências

Em relação aos efeitos da HR, diversos autores procuraram estabelecer faixas ótimas para o armazenamento e a proteção do acervo. Do ponto de vista da conservação documental, Urgellés e Crehuet (2002), apontam para a necessidade de manter valores acima de 40%, a fim de garantir a segurança dos documentos, uma vez que níveis inferiores aumentam a fragilidade do papel. Adcock et al. (1999) indicam o intervalo entre 55% e 60% como o mais adequado para a proteção do acervo, com o objetivo de reduzir os riscos de danos mecânicos aos materiais e minimizar o risco de ataques microbiológicos. De forma consonante, Flieder e Duchein (1993) defendem que valores entre 50% e 60% de HR contribuem para a redução dos danos mecânicos nos documentos.

A Tabela 2 apresenta as principais faixas de HR e os respectivos efeitos sobre a preservação do acervo, de acordo com Adcock et al. (1999).

Tabela 2 Correlação entre faixas de Humidade Relativa e os efeitos sobre o acervo

Faixa de HR (%)	Efeito da Humidade Relativa sobre o acervo (Adcock et al., 1999)
Abaixo de 40%	Baixo risco de danos causados por alterações químicas do material; aumento da suscetibilidade a encolhimento, enrijecimento e rachaduras; material pode se tornar quebradiço.
55 % – 60%	Baixo risco de danos mecânicos; baixo risco de ataques biológicos.
60% -65%	Aumento do risco de ataque biológico causado por mofo.
Acima de 65%	Os adesivos utilizados para identificação do acervo podem amolecer e perder sua capacidade adesiva; alto risco de ataques biológicos.
Acima de 70%	Altíssimo risco de ataques biológicos.

Diante deste cenário, Rooney (1994) tenta conciliar as necessidades da proteção do acervo com os princípios da ergonomia em ambientes de bibliotecas universitárias, estabelecendo assim como faixa mais adequada entre 50% e 55%.

2.4 Poluentes do ar interior e impactos em bibliotecas

A poluição do ar é definida como alterações nas propriedades naturais da atmosfera decorrentes da emissão de agentes físico, químicos e biológicos, podendo ser observada em ambientes internos ou externos (WHO, 2024). Neste sentido, os poluentes do ar são substâncias que devido a concentração, a persistência ou outras características tornam o ar prejudicial à saúde humana, comprometendo o bem-estar coletivo ou causando danos aos ecossistemas (CONAMA, 2018). Em ambientes de interior, a presença de poluentes resulta da contribuição das emissões de fontes interiores e da entrada de contaminantes do exterior por meio da ventilação.

A presença de poluentes nos ambientes especialmente no interior de bibliotecas oferece riscos aos utilizadores e à conservação dos materiais. Entre os poluentes de maior preocupação para a saúde estão: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogénio (NO₂), material particulado (MPx), radão (Rn) e compostos orgânicos voláteis (COVs), tais como formaldeído, benzeno e tricloroetileno, além de contaminantes biológicos como vírus, bactérias, fungos e grãos de pólen (WHO, 2010; US EPA, 2024).

Do ponto de vista da conservação do acervo, a influência dos poluentes pode variar de acordo com as características dos materiais presentes, como papel, couro, fotografias e tecidos, bem como do nível de fragilidade e do estado de conservação dos mesmos. Entre os poluentes observados com cautela em ambientes de bibliotecas, museus e arquivos estão os materiais particulados, compostos ácidos e elementos oxidantes (Drougka et al., 2020). Neste sentido, guias e manuais sobre preservação de acervos e bibliotecas indicam dióxido de enxofre (SO₂), ozono (O₃), material particulado e compostos orgânicos voláteis como os principais responsáveis pela degradação física deste tipo de materiais. (Adcock et al., 1999; Camuffo et al., 2019; Brown et al., 2002; Tétrault, 2021). A Tabela 3 sintetiza os principais poluentes físico-químicos relacionados à deterioração do acervo.

Tabela 3 Poluentes físico-químico descritos pela bibliografia técnica

Poluentes físico-químicos	Adcock et al (1999)	Camuffo et al., (1998)	Brown et al (2002)	Tétreault (2021)
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	X	X	X	X
Dióxido de Azoto (NO ₂)	X	X	X	X
Ozônio (O ₃)	X	X	X	X
Material Particulado (MPx)	X	X	X	X
Ácidos Carboxílicos		X	X	X
Compostos Orgânicos Voláteis (COVs)		X	X	X
Vapor de água				X

Em Portugal, embora não haja legislação específica sobre a qualidade do ar no interior de bibliotecas, a Portaria n.º138-G/2021 estabelece a monitorização de poluentes em edifícios de comércio e serviços, categoria na qual as bibliotecas universitárias podem ser enquadradas. Os poluentes monitorizados por essa regulamentação são: radão, monóxido de carbono, dióxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, formaldeído, material particulado e contaminantes microbiológicos (bactérias e fungos).

2.4.1 Radão

O Radão (Rn) é um elemento químico radioativo, normalmente encontrado na forma gasosa. Por se tratar de um gás inerte, incolor e inodoro sua deteção em ambientes internos é dificultada. A formação do Rn ocorre através do processo natural de decaimento do Urânio-238, sendo gerado diretamente pelo decaimento do Rádio-226 (Čeliković et al., 2022).

Em ambientes fechados, a presença de Rn pode ocorrer de duas formas: pela infiltração do gás por meio de rachaduras ou fraturas nas estruturas dos edifícios; ou pelo uso de determinados materiais de construção (ABNT, 2023). Neste sentido, o acúmulo de Rn em espaços internos é mais significativo em condições de ventilação reduzida ou inexistente (Real et al., 2024). De acordo com Ferreira e Coelho (2006), aproximadamente 95% do Rn encontrado em ambientes fechados provém da exalação do solo, enquanto cerca de 5% é oriundo dos materiais de construção.

No contexto da saúde pública, o Rn é a principal fonte de radiação ionizante à qual a população mundial está exposta, sendo responsável por aproximadamente 55% da dose total de radiação recebida pelos seres humanos (Belete & Anteneh, 2021). O principal efeito adverso associado à exposição ao radão é o desenvolvimento de cancro de pulmão (WHO, 2010). Para proteger a população em relação aos níveis de exposição interna ao radão, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda um limite de 100 Bq/m³ para minimizar os riscos (WHO, 2009). Contudo, em situações em que as condições específicas de um país não permitem atender a esse limiar, é permitido que o nível não ultrapasse 300 Bq/m³ (WHO, 2010)

Do ponto de vista da legislação portuguesa, nomeadamente a Portaria 138-G/2021, declara a obrigatoriedade de análise do Rn apenas em edifícios construídos em zonas graníticas, especificamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco.

2.4.2 Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás emitido a partir de processos de combustão incompleta que utilizam combustíveis à base de carbono, como madeira, carvão e gasolina, entre outros. É um gás incolor, inodoro, insípido e tóxico, o que dificulta sua deteção sem o uso de instrumentos específicos. Em ambientes internos, as fontes mais comuns de CO são processos de combustão, como o fumo de cigarros, a cocção de alimentos, e a infiltração de emissões externas (ABNT, 2023).

A presença de CO em ambientes internos é motivo de grande preocupação do ponto de vista da saúde, devido aos seus efeitos silenciosos e prejudiciais. O CO é alvo de grandes preocupações com relação a saúde humana, devido à sua afinidade com a hemoglobina (APA, 2010). A hemoglobina é uma proteína presente no sangue que desempenha um papel essencial no transporte de oxigénio e dióxido de carbono para os tecidos e órgãos, sendo fundamental para a realização das trocas gasosas. Contudo, a hemoglobina possui uma afinidade cerca de 200 a 240 vezes maior pelo CO do que pelo oxigénio (Mottin, 2009). Assim, durante a exposição a concentrações elevadas de CO, a hemoglobina tende a ligar-se preferencialmente ao monóxido de carbono, o que impede a oxigenação adequada do corpo humano (APA, 2010).

Diante deste cenário, a exposição ao CO é especialmente preocupante, estando associada a efeitos adversos para a saúde dos ocupantes. A exposição pode ocorrer de forma aguda ou crónica. Contudo, os estudos enfrentam dificuldades em avaliar os efeitos da exposição contínua a baixas concentrações de CO (Townsend & Maynard, 2002; Prockop & Chichkova, 2007). Por outro lado, os efeitos da exposição aguda são bem conhecidos e delimitados. A Tabela 4 apresenta os principais efeitos decorrentes da exposição aguda ao CO, de acordo com a US EPA (2025a).

Tabela 4 Concentrações de CO e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes de acordo com US EPA (2025a)

Concentração	Efeitos adversos a saúde dos ocupantes
Baixa	Fadiga em pessoas saudáveis; Dor no peito em pessoas com doença cardíaca
Moderada	Angina; Visão prejudicada; Função cerebral reduzida
Elevadas	Visão e coordenação prejudicadas; Dores de cabeça; Tontura; Confusão; Náusea; Sintomas semelhantes aos da gripe que desaparecem depois de sair do ambiente fechado; Fatal (em concentrações muito altas)

Com o objetivo de garantir a segurança dos ocupantes, a WHO (2010) estabeleceu limites máximos de exposição ao CO. A Tabela 5 apresenta as concentrações máximas permitidas, de acordo com o tempo de exposição.

Embora as bibliotecas universitárias não constituam fontes significativas de CO, este poluente pode ainda assim estar presente no seu interior, devido à existência de espaços como laboratórios ou cafetarias, ou através da introdução de ar exterior.

Tabela 5 Concentrações máximas de CO por tempo de exposição

Tempo de exposição	Concentração de CO (mg/ m ³)*	Concentração de CO (ppm)*
15 minutos	100	87,29
1 hora	35	30,55
8 horas	10	8,73
24 horas	7	6,11

* A conversão de unidade utilizou como condições padrões 1 atm e 25°C

Fonte: Adaptado de WHO (2010)

Jain et al. (2025) observaram concentrações inferiores a 1 ppm ao estudarem a qualidade do ar numa biblioteca do IIT Kanpur, na Índia, associando a presença deste poluente, ainda que em baixas concentrações, à entrada de ar exterior, apontando a proximidade de estacionamentos ao redor do edifício como uma das possíveis causas.

No contexto português, Ferreira e Cardoso (2013), ao estudarem a presença de CO em salas de aula em Coimbra, observaram concentrações médias entre 0,627 ppm e 0,445 ppm no outono e inverno, e entre 0,107 ppm e 0,159 ppm na primavera e no verão. Durante o período da investigação, observaram concentrações exteriores médias de 0,433 ppm no inverno e no outono e 0,075 ppm na primavera e no verão. De acordo com os autores, as variações registadas devem-se principalmente à utilização de sistemas de aquecimento à base de combustão nos meses mais frios, o que pode indicar tanto a introdução de poluentes exteriores como a ineficiência dos sistemas de extração de CO nos ambientes interiores.

Em Bragança, especialmente durante os meses frios, é comum a utilização de sistemas de aquecimento à base de combustão de matéria orgânica (Lira, 2018). De acordo com Ferreira (2012), a principal fonte de aquecimento na cidade é a queima de biomassa lenhosa. Neste contexto, o aumento da concentração de CO nos ambientes interiores, mesmo na ausência de fontes internas diretas, é expectável durante os períodos mais frios do ano.

2.4.3 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO₂) é um gás inodoro e incolor. A formação natural do CO₂ ocorre a partir da respiração dos seres vivos, da decomposição da matéria orgânica e de erupções vulcânicas. Já a produção antrópica de CO₂ está relacionada a processos de combustão e ao desmatamento. Em espaços interiores, as principais fontes de CO₂ são o metabolismo humano e processos de combustão (ABNT, 2023; APA, 2010).

Ao longo dos séculos, o CO₂ foi utilizado como um parâmetro confiável para a definição da taxa de ventilação das edificações e da qualidade do ar interior. De acordo com Klauss et al. (1970), a associação entre o CO₂, a ventilação e a qualidade do ar interior originaram-se de um equívoco de Lavoisier (século XVIII), que atribuiu a insalubridade do ar em espaços confinados a níveis elevados de CO₂, e não à diminuição da concentração de O₂. Aproximadamente 100 anos após Lavoisier, Von

Pettenkofer afirmou que, embora o CO₂ pudesse ser um indicativo de ar viciado, os problemas de qualidade do ar interior ocorriam devido à presença de contaminantes biológicos provenientes dos ocupantes dos espaços fechados (Persily, 2015).

As discussões sobre o papel do CO₂ na qualidade do ar em ambientes fechados e sua associação com a ventilação desenvolveram-se ao longo dos séculos e ainda são uma questão controversa. Persily (2020) e Herrmann (2002) afirmam que não é possível correlacionar diretamente a qualidade do ar interior ou a taxa de ventilação com os níveis de CO₂ observados nos espaços interiores. Essa impossibilidade ocorre devido a múltiplos fatores, entre eles: a escassez de nexos causal entre a exposição a concentrações de CO₂ e o desenvolvimento de doenças ou sintomas; e a influência da quantidade de pessoas e das características individuais na taxa de emissão de CO₂ (Herrmann, 2002; Persily, 2020).

Apesar disso, diversas pesquisas (Marques et al., 2019; Lazović et al., 2016) utilizam o CO₂ como um parâmetro primordial para a avaliação das condições adequadas de qualidade do ar interior (QAI) e de ventilação. Além disso, o CO₂ é amplamente adotado por normas técnicas e legislações como um parâmetro fundamental para a avaliação da ventilação e da qualidade do ar. De acordo com a ABNT (2023) e com Persily (2022), as concentrações mensuradas de CO₂ refletem essencialmente a produção de bioefluentes responsáveis pela geração de odores em ambientes interiores.

2.4.4 Compostos orgânicos voláteis

Os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) são uma classe de substâncias orgânicas caracterizadas por alta pressão de vapor e baixa solubilidade em água em condições normais de temperatura e pressão, o que facilita sua volatilização. Estima-se que existam mais de 900 compostos classificados como COVs, oriundos tanto de fontes antrópicas quanto naturais (APA, 2010).

As fontes naturais de COVs incluem emissões vegetais, incêndios florestais e processos anaeróbicos (Almaie et al., 2022). Por outro lado, as fontes antrópicas estão majoritariamente associadas a atividades domésticas e industriais, como extração de alimentos, uso de fertilizantes e pesticidas, sistemas sépticos, processos de cloração, tráfego, queima de combustíveis fósseis, armazenamento e distribuição de petróleo, limpeza têxtil, impressão e indústrias farmacêuticas (David & Niculescu, 2021).

Em ambientes como bibliotecas e museus a identificação destes poluentes estão relacionadas aos materiais do acervo, como papéis, tintas e adesivos antigos (Uhde & Salthammer, 2007). Além disso, a presença de mobiliários, equipamentos eletrônicos e determinados tipos de acabamentos nos espaços interiores também estar associados a observação destes poluentes. Na Tabela 6 são apresentados os principais COV encontrados em ambientes interiores e suas respectivas fontes.

Tabela 6 COVs normalmente encontrados e as suas principais fontes.

Substâncias	Fontes
Acetona	Tintas, revestimentos, acabamentos, solvente de tintas, diluidor, calafetagem

Hidrocarbonetos alifáticos (octano, decano, ndecano, hexano, i-decano, misturas, etc.)	Tintas, adesivos, gasolina, fontes de combustão, fotocopiadoras com processo líquido, carpetes, linóleo, componentes de calafetagem
Hidrocarbonetos aromáticos (tolueno, xileno, etilbenzeno, benzeno)	Fontes de combustão, tintas, adesivos, gasolina, linóleo, revestimento da parede
Solventes clorados	Artigos de limpeza ou de proteção de tapeçarias e carpetes, tintas, solvente de tintas, lacam, solventes, fluido de correção, roupas limpas a seco
Acetato de n-butyl	Telha acústica do tecto, linóleo, compostos de calafetagem
Diclorobenzeno	Carpetes, cristais de naftalina, refrescante de ar
4-fenil ciclohexano (4-PC)	Carpetes e tintas
Terpenos (limoneno, α -pineno)	Desodorizantes, agentes de limpeza, polidores, tecido/decoração, tecido/decoração emoliente, cigarros

Fonte: APA, 2010

Os COVs despertam significativa preocupação devido aos riscos que representam à saúde humana (Almaie et al., 2022). Segundo Wolkoff (2013), a exposição prolongada a concentrações elevadas de COVs pode provocar sintomas como dores de cabeça, irritações nos olhos e vias respiratórias, fadiga, tontura e náuseas, efeitos que se agravam com a permanência contínua nesses ambientes. A Tabela 7 descreve exemplos de COVs e seus potenciais efeitos adversos à saúde.

Com relação à presença desses poluentes em ambientes interiores, Gibson et al. (2012) realizaram uma avaliação da concentração de compostos orgânicos voláteis (COVs) em oito bibliotecas e arquivos nacionais no Reino Unido e na Irlanda. Durante as análises, os investigadores observaram uma elevada concentração de ácido acético e furfural (aldeído derivado do furano, com um anel aromático pentagonal ligado a um grupo formilo (-CHO)) em ambientes com materiais à base de papel, o que sugere que esses compostos, juntamente com trimetilbenzenos e cânfora, podem ser utilizados como indicadores da degradação da celulose. Ainda segundo o estudo, os poluentes emitidos pelo papel incluíram tolueno, furfural, benzaldeído, etilhexanol, nonanal e decanal.

De forma consonante, Lee et al. (2021) conduziram uma investigação no arquivo da Biblioteca Nacional da Coreia (NLK), com o objetivo de avaliar a concentração, o tipo e as características de distribuição de poluentes nesse espaço. O estudo apontou para uma concentração média de $320,03 \pm 44,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de COVs totais no interior do edifício. Além disso, cinco COVs foram identificados: hexano, benzeno, tolueno, álcool isobutílico e metil-etil-benzeno. Destacam-se o tolueno, o hexano e o benzeno, que apresentaram valores superiores a 1 na razão I/E, sugerindo que esses poluentes têm origem em fontes internas.

Tabela 7 COVs e sintomas graves observados após exposição, de acordo com David & Niculescu (2021)

Substâncias	Utilização	Sintomas observados após a exposição
Formaldeído	Utilizado na fabricação de resinas para materiais de construção, papel, revestimentos para tecidos de vestuário	Cancro
Cloreto de vinila	Utilizado na fabricação de plásticos (PVC), revestimentos de piso e bens de consumo	Cancro e danos ao fígado
Tricloroetileno	Utilizado como solvente industrial	Taquipneia, arritmias cardíacas, depressão respiratória e circulatória

Tetracloroeto de carbono	Utilizado em extintores de incêndio, como um agente precursor de refrigerantes e também como um agente de limpeza	Danos ao sistema nervoso central e degeneração do fígado e dos rins
Tolueno	Utilizado como matéria-prima industrial e solvente em alguns tipos de diluentes de tinta, marcadores permanentes, alguns tipos de cola	Danos neurológicos graves
Acetona	Utilizado como um importante solvente orgânico	Problemas respiratórios
Álcool isopropílico	Utilizado na fabricação de cosméticos, produtos farmacêuticos, perfumes, soluções de corantes, anticongelantes, sabões, agentes de limpeza e desinfecção.	Problemas respiratórios
Hexanal ou hexaldeído	Utilizado como aromatizante na indústria alimentícia e como fragrância em perfumes ou para obter outros produtos químicos que são usados na fabricação de plásticos, borrachas e inseticidas.	Sensação de asfixia, tosse e respiração rápida.
Dissulfeto de carbono ou bissulfeto de carbono	Utilizado na fabricação de rayon viscoso e celofane	Problemas respiratórios

De forma complementar, Cammufo et al. (2019) e Tétrault (2021) listam os principais poluentes prejudiciais aos diversos materiais presentes em acervos, museus e bibliotecas. A Tabela 8 apresenta uma síntese dos principais COVs capazes de gerar impactos negativos em peças de acervo.

Tabela 8 COVs e seus principais impactos sobre acervo

Substâncias	Riscos ao acervo (Cammufo et al., 2019; Tétrault, 2021)
Formaldeído	Pode ser oxidado em ácido fórmico e corrosão de metais
Ácido fórmico	Alteração da coloração de alguns materiais, fragilização do papel e corrosão de metais
Dissulfeto de carbono	Descoloração de imagens fotográficas
Ácido acético	Alteração da coloração de alguns materiais, fragilização do papel e corrosão de metais

2.4.5 Formaldeído

O formaldeído (CH_2O) é um COV de odor característico, altamente reativo e inflamável à temperatura ambiente. É amplamente utilizado na produção de resinas (ureia, fenol, melamina), poliacetais, adesivos e revestimentos de superfícies, especialmente na indústria madeireira e têxtil (CETESB, 2022). O CH_2O é um dos compostos orgânicos voláteis mais comuns e preocupantes encontrados em ambientes interiores, especialmente em locais como bibliotecas e arquivos, onde materiais de construção, mobiliário, papéis envelhecidos e produtos de conservação podem liberar esse gás tóxico (Salthammer et al., 2010). O formaldeído pode ser emitido de forma natural ou antrópica. Entre as principais fontes naturais de emissão deste poluente estão a combustão de biomassa, decomposição da matéria orgânica e atividades vulcânicas (APA, 2010). Já a emissão antrópica pode ocorrer a partir de emissões industriais, queima de combustíveis, materiais de acabamento, adesivos, mobiliário e materiais de decoração (ABNT, 2023; WHO, 2010).

A temperatura e a humidade desempenham papéis significativos na volatilização e na concentração de formaldeído em ambientes internos. Temperaturas mais altas podem aumentar a taxa de liberação do gás a partir de materiais que o contêm, enquanto a humidade pode afetar a absorção

do composto pelos materiais ou a sua volatilidade (APA, 2010). Em ambientes interiores, a principal forma de exposição das pessoas ao formaldeído é por inalação (WHO, 2010). Na Tabela 9 estão descritos os principais sintomas observados após exposições agudas ao formaldeído.

Tabela 9 Concentrações de Formaldeído e seus efeitos sobre a saúde dos ocupantes

Concentração (mg/ m ³)*	Concentração (ppm)*	Efeitos sobre a população
0,6	< 0,489	Incômodos relacionado ao odor
0,1 – 3,7	0,081 – 3,230	Irritação nasal, ocular e da garganta; Redução da taxa de fluxo muco-nasal e dores de cabeça pós exposição
2,5 – 6,2	2,036 – 5,049	Irritação intensa nos olhos e nariz Redução na função pulmonar Lacrimejamento dos olhos
12 – 60	9,772 – 48,858	Lacrimejamento severo e risco de edema pulmonar
> 60	> 48,858	Pode causar pneumonia, edema pulmonar e até a morte

* A conversão de unidade utilizou como condições padrões 1 atm e 25°C

Fonte: Adaptado de WHO (2010)

Estudos relacionados à presença de formaldeído em ambientes de bibliotecas e museus observam diferentes fontes e concentrações desse poluente. Yang (2017) estudou a qualidade do ar no interior da biblioteca da Universidade Shandong Women's, na China. O estudo encontrou concentrações de formaldeído entre 0,01 mg/m³ e 0,11 mg/m³, sendo a presença do poluente associada a elementos do mobiliário e itens decorativos, como sofás de couro, pinturas e painéis decorativos.

De forma similar, Fantuzzi et al. (1996) investigaram a qualidade do ar no interior das bibliotecas da Universidade de Modena, na Itália, tendo encontrados valores entre 0,0017 mg/m³ e 0,0678 mg/m³, com média de 0,0327 mg/m³. A investigação identificou diferenças significativas entre as bibliotecas localizadas no centro da cidade e aquelas situadas em zonas suburbanas. As bibliotecas centrais apresentaram maior variação e concentrações mais elevadas de formaldeído. Além disso, foi observada uma proximidade incomum entre as concentrações internas e externas, atribuída principalmente à ventilação natural realizada através da abertura de janelas

Wu et al. (2018) estudaram nove salas da biblioteca da Universidade Tecnológica de Pequim, em abril de 2016, todas sem climatização centralizada. As concentrações de formaldeído variaram entre 0,01 mg/m³ e 0,042 mg/m³. Os maiores valores foram observados em salas exclusivamente destinadas ao armazenamento de livros, enquanto as menores concentrações foram registradas em áreas de leitura.

Kim et al. (2013) avaliaram 66 bibliotecas e salas de leitura localizadas na região metropolitana de Seul, na Coreia do Sul e os valores observados variaram de 0,0292 mg/m³ a 0,1193 mg/m³, sendo

as maiores concentrações registadas em salas privadas de leitura. Segundo os autores, esse resultado está associado a deficiências nos sistemas de ventilação. O estudo também apontou que parâmetros como temperatura, HR, número de fontes internas de emissão e taxa de ventilação foram determinantes para os níveis de formaldeído observados em ambientes interiores.

Além do papel, o formaldeído pode afetar tintas, pigmentos e metais presentes em encadernações, ilustrações e manuscritos. A sua elevada reatividade contribui para processos de corrosão e descoloração, especialmente em obras que contenham sais metálicos ou componentes sensíveis à acidez (Tétreault, 2003).

2.4.6 Material Particulado

Material particulado (PMx) referem-se a partículas suspensas no ar, constituídas por uma mistura de partículas sólidas e gotículas líquidas (US EPA, 2023). Essas partículas podem ser classificadas como primárias, quando são libertadas diretamente na atmosfera a partir de suas fontes, ou secundárias, quando resultam da interação de poluentes já presentes no ambiente (APA, 2021).

Uma das principais formas de classificar os PMx é a partir da dimensão da partícula, para isso é utilizado o diâmetro aerodinâmico equivalente da partícula. A dimensão é um parâmetro crucial nas discussões sobre saúde pública, pois o tamanho das partículas correlaciona-se com a probabilidade de penetração no sistema respiratório e com a potencialidade de causar efeitos adversos à saúde (APA, 2021). A Tabela 10 descreve os principais tamanhos de PMx e seu potencial de penetração no sistema respiratório.

Nos ambientes interiores, a presença de PMx ocorre principalmente por meio da migração de partículas do exterior, emissões internas geradas por atividades (como combustão e limpeza) e pela presença de fontes biológicas. O comportamento dos PMx em ambientes fechados é influenciado por três processos fundamentais: origem das partículas, remoção/perdas e transformação (NASEM, 2024). A Figura 2 apresenta os principais processos e mecanismos que influenciam as dinâmicas de PMx em ambientes interiores, de acordo com NASEM (2024).

Tabela 10 Categorização dos PMx por tamanho e seu grau de penetração no sistema respiratório

Nome	Abreviação	Definição	Penetração no sistema respiratório (Arbex et al. 2012)
Partículas em suspensão	PTS	Partículas que possuem mais de 10 µm de diâmetro aerodinâmico equivalente	Nariz e garganta
Partículas inaláveis grossas	PM ₁₀	Partículas que passam através de uma entrada seletiva de tamanho com 50% de eficiência para partículas de 10 µm de diâmetro aerodinâmico equivalente	Traqueia, brônquios e bronquíolos

Partículas finas ou respiráveis	PM _{2,5}	Partículas que passam através de uma entrada seletiva de tamanho com 50% de eficiência para partículas de 2,5 µm de diâmetro aerodinâmico equivalente	Alvéolos
Partículas ultrafinas	PM _{0,1}	Partículas que passam através de uma entrada seletiva de tamanho com 50% de eficiência para partículas de 0,1 µm de diâmetro aerodinâmico equivalente	Alvéolos, tecido pulmonar, corrente sanguínea

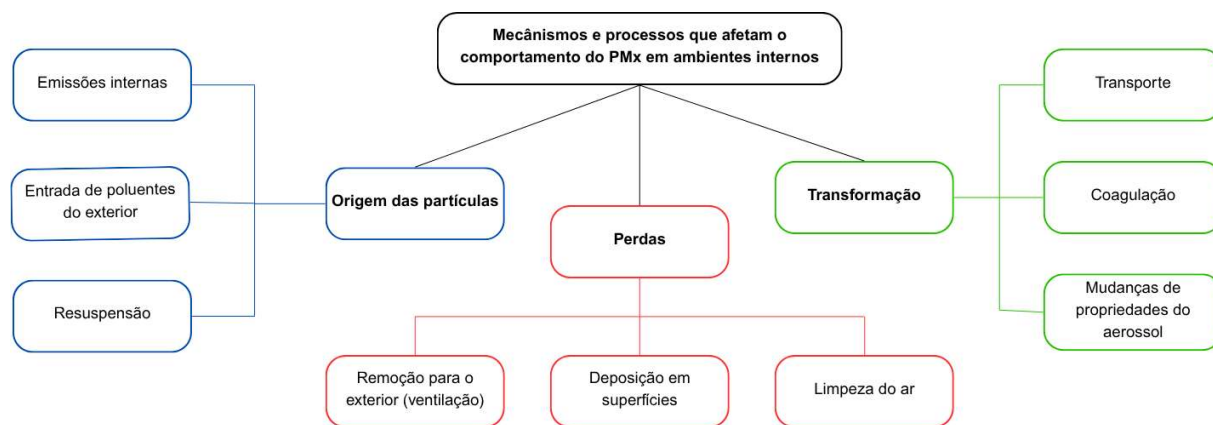


Figura 2 Esquema representativo dos principais processos e mecanismos que influenciam as dinâmicas de PMx em ambientes interiores, de acordo com NASEM (2024).

No que diz respeito aos estudos sobre material particulado em ambientes interiores, observou-se que os mais investigados são o PM₁₀ e o PM_{2,5}, devido à sua relevância para a qualidade do ar interior (QAI) e impactos na saúde.

Güneş et al. (2022) estudaram as características da QAI em bibliotecas universitárias na cidade de Bartın, na Turquia, entre os meses de setembro e agosto. Os valores de PM_{2,5} variaram entre 0 µg/m³ e 49 µg/m³, com uma média de 23 µg/m³. Para o PM₁₀, oscilaram entre 0 µg/m³ e 81 µg/m³, também com média de 23 µg/m³. As maiores concentrações de PM_{2,5} foram observadas no mês de dezembro, enquanto os valores mais elevados de PM₁₀ ocorreram nos meses de novembro e dezembro. Estes picos de concentração durante o outono podem estar associados ao aumento da presença de ocupantes no interior das bibliotecas, bem como a fatores exteriores.

Num estudo conduzido por Li et al. (2017), que visava compreender as dinâmicas do PM_{2,5} numa biblioteca universitária do norte da China durante o inverno, foi observada uma correlação entre as concentrações do poluente no interior e no exterior da edificação. No entanto, as concentrações exteriores foram frequentemente superiores aos interiores, sugerindo uma origem predominantemente externa. As médias de concentração de PM_{2,5} variaram entre 70 e 498 µg/m³, com picos durante os meses de inverno. O estudo também destacou o papel das correntes de ar internas como principais responsáveis pela distribuição do poluente no interior do edifício.

Mašková et al. (2015) analisaram a composição do material particulado em arquivos na Chéquia, sendo três edifícios com ventilação natural e um com ventilação filtrada. O estudo, realizado

ao longo de um ano, revelou a predominância de matéria orgânica na composição das partículas finas e grossas, representando entre 50% e 80% do total. Nas partículas finas, observou-se abundância de carbono elementar e sulfatos, enquanto nas partículas grossas, os constituintes predominantes foram matéria crustal, sulfatos e nitratos. Os autores constataram uma forte influência das características exteriores sobre a composição do material particulado interior, especialmente em edifícios com ventilação natural. As principais fontes identificadas foram o aquecimento doméstico, o tráfego rodoviário, indústrias locais e incêndios.

Em Bragança, o funcionamento de sistemas de aquecimento residencial à base de biomassa lenhosa contribui para o aumento das concentrações de material particulado, sobretudo durante os meses mais frios do ano (Lira, 2018; Ferreira, 2012). Segundo Cipoli (2020), a cidade apresenta uma elevada variabilidade na distribuição atmosférica de PM. O mesmo estudo identificou concentrações médias de 2,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ e 9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} em dias úteis. As zonas mais poluídas foram identificadas em cânios urbanos, áreas de construção, zonas industriais, túneis e proximidades de semáforos. Em contraste, áreas verdes, terrenos sem construções e zonas residenciais apresentaram os menores níveis de poluição.

Em relação à preservação de acervos, o material particulado é um poluente especialmente preocupante. Na Tabela 11 são descritas as principais composições de material particulado consideradas de risco para a conservação e preservação de documentos e objetos de acervo, incluindo suas origens e os danos potenciais que podem causar aos materiais.

Tabela 11 Composição e efeitos do material particulado na preservação de acervos

Tipo do PMx	Origem	Danos ao acervo
Geral	Humidificador de aerossol, velas acesas, betão, cozimento, impressoras a laser, reformas, latas de spray, queda de pelos de roupas, carpetes, caixas de embalagem (devido à abrasão, vibração ou desgaste), atividades industriais, construção de edifícios ao ar livre e solo	Abrasão; Descoloração de objetos; Enrijecimento das fibras do papel
Compostos biológicos e orgânicos	Microrganismos, degradação de materiais e objetos, pelos de visitantes e animais e atividades de construção	Fragilização; Abrasão; Rasgos; Sujidade das superfícies

Tabela 11 (continuação)

Sais de amónio	Reação da amónia com SO_2 ou NO_2 em ambientes internos ou externos ou em superfícies sólidas	Manchas em pinturas e móveis envernizados com resinas naturais; Deposição de sólidos brancos na superfície dos objetos; Deterioração do papel
Fuligem (carbono orgânico)	Velas acesas, incêndios, combustão de carvão e exaustão de veículos	Descoloração de superfícies porosas; Fragilização do papel

Fonte: Adaptados de Tétrault (2021)

2.4.7 Poluentes microbiológicos

Os microrganismos desempenham um papel essencial para a manutenção da vida, pois participam em processos naturais de reciclagem de nutrientes e em várias atividades antrópicas. No entanto, a relação entre microrganismos e seres humanos nem sempre é benéfica. Microrganismos patogênicos, por exemplo, estão associados ao desenvolvimento de doenças que impactam negativamente a saúde humana (US EPA, 2025b). Assim, o controle e a monitorização dessas espécies são fundamentais para garantir a segurança dos ambientes internos.

De acordo com a APA (2010), a contaminação microbiológica em ambientes internos ocorre principalmente por fungos (bolores e leveduras) e bactérias, os quais podem ser prejudiciais à saúde. Os principais efeitos negativos na saúde humana causados pela exposição a esses microrganismos incluem irritações, reações alérgicas, infecções e reações tóxicas (APA, 2010; Bosco et al., 2020).

A presença destes microrganismos está fortemente associada a condições ambientais inadequadas, como elevados níveis de humidade relativa (acima de 60%), ventilação deficiente e acumulação de poeiras orgânicas (Adcock et al., 1999; Tétreault, 2003; Guarnieri et al., 2023). No contexto da proteção de acervos em bibliotecas, os microrganismos representam um risco de biodeterioração de materiais, como o papel (Gutarowska, 2013). O papel é constituído maioritariamente por celulose, que pode servir como fonte de carbono para microrganismos. Além disso, Bosco et al. (2020) destacam que o papel é um material biorreceptível, ou seja, é facilmente colonizado por diferentes organismos microbiológicos. Assim, o papel se torna um meio suscetível ao ataque microbiológico.

2.4.7.1 Fungos

Os fungos são organismos eucariotas que desempenham um papel fundamental na biodeterioração de materiais em ambientes fechados, como bibliotecas, arquivos e museus. Em condições favoráveis (humidade relativa superior a 60%, temperatura moderada e baixa circulação de ar) tornam-se agentes altamente ativos na degradação de suportes orgânicos (Adcock et al., 1999; Camuffo, 2019). A colonização fúngica causa manchas de coloração acastanhada, esverdeada ou preta, mau odor, enfraquecimento mecânico das fibras e, eventualmente, perda irreversível de informação.

A Tabela 12 apresenta a síntese de trabalho desenvolvidos a partir da monitorização de fungos em bibliotecas e arquivos, sendo possível observar os nomes dos autores, a época do ano em que os estudos foram realizados, o tipo de ambiente estudado, a concentração média de fungos (UFC/ m³) e os géneros identificados. Diante deste cenário, observa-se uma grande variedade de géneros de fungos em ambientes de biblioteca, bem como uma ampla variação nas concentrações de fungos. Essa diversidade pode resultar de inúmeros fatores, como: características térmicas dos interiores, taxa de ocupação, características da ventilação da edificação, microbiota local, metodologia de amostragem, época do ano, entre outros. Por essa razão, é praticamente impossível definir uma faixa padrão para a presença de fungos em espaços interiores, mesmo quando esses ambientes

apresentam características semelhantes, como os casos destacados. Ainda assim, alguns géneros são frequentemente identificados nesses locais, destacando-se: *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Fusarium* e *Trichoderma*.

Para além dos danos causados ao acervo, há uma preocupação com a segurança dos ocupantes destes espaços, tendo em vista que a presença de patógenos pode representar riscos para a saúde humana. Os principais géneros de fungos patogénicos encontrados em ambientes interiores são: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Candida*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium* e *Rhodotorula*.

O género *Alternaria* é constituído principalmente por fungos saprófitos, apesar disso, algumas espécies adquiriram capacidades patogénicas, sendo responsáveis por doenças observadas numa ampla gama de hospedeiros (Thomma, 2003). Entre os principais riscos para a saúde humana decorrentes da exposição a espécies de *Alternaria* estão o desenvolvimento de problemas respiratórios, como asma, rinite, sinusite e bronquite, devido ao seu papel alergénico (Fernandes et al., 2023). Além disso, essas espécies apresentam mecanismos de defesa baseados na citotoxicidade e na mutagenicidade, o que as torna um risco adicional para a saúde humana (Pinto & Patriarca, 2016; Nguyen et al., 2018).

O género *Aspergillus* é formado por fungos oportunistas, comumente encontrados no solo, no ar e em matéria orgânica em decomposição (Mousavi et al., 2016). Os principais riscos para a saúde decorrentes da exposição a espécies de *Aspergillus* incluem: problemas respiratórios, como asma, rinite, sinusite e bronquite; infeções superficiais e locais; infeções associadas a tecidos danificados; e infeções pulmonares e extrapulmonares (Public Health Agency of Canada, 2011).

O género *Cladosporium* é constituído por fungos encontrados em diversos ambientes, desde plantas e matéria orgânica até tintas e tecidos (Bensch et al., 2012). As doenças causadas por espécies pertencentes ao género *Cladosporium* podem variar desde infeções superficiais até sepses, sendo os tipos de infeção mais frequentemente observados: doenças alérgicas, problemas respiratórios, infeções superficiais e profundas, abscesso cerebral e feo-hifomicoses (Menezes et al., 2017).

Fusarium é geralmente observado no solo e como fitopatógenos (Guerrero et al., 2022). Apesar disso, esse género pode causar diversos problemas de saúde humana como infeções locais, especialmente em unhas, pele, olhos e seios nasais; e infeções sistémicas, observadas principalmente em pacientes imunocomprometidos (Hof, 2020).

O género *Penicillium* é composto por fungos com características morfológicas e metabólicas muito diversas (Silva et al., 2010). Do ponto de vista da saúde, este género está associado ao desenvolvimento de doenças alérgicas e respiratórias (Bezerra et al., 2014).

E por fim, o género de *Rhodotorula* é omnipresente e coloniza desde plantas até animais (Hof, 2019). As principais infeções causadas por espécies deste género são: endoftalmite, onicomicose, meningite, infeções de próteses articulares e peritonite (Wirth & Goldain, 2012).

Tabela 12 Presença fúngica descritas em bibliotecas, museus, repositórios e arquivos

Autores	País	Época do ano	Ambientes estudados	Tipo de ventilação	HR do ar (%)	Temperatura (°C)	Tipo de colheita	Método de colheita	Meio de cultura	Gêneros de fungos encontrados	UFC /m ³
Hayleeyesus & Manaye (2014)	Etiópia	Primavera	Biblioteca universitária	ND	ND	ND	Passiva	SP	SDA	<i>Cladosporium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Penicillium</i> e <i>Aspergillus</i>	524 – 1992
Hassan et al (2021)	Paquistão	Inverno	Biblioteca pública	VM e VN	VM: 48% – 58%; VN: 41 % - 58%	VM: 15°C - 19°C; VN: 19°C - 26°C	Ativa	Filtração	PDA	<i>Cladosporium</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus</i> e <i>Talaromyces</i>	VM: 60 – 150; VN: 20 - 250
Iliopoulou et al (2024)	Grécia	4 estações	Biblioteca Nacional	VM	Não definido	19°C - 25°C	Ativa	Impacto	PDA	<i>Penicillium</i> , <i>Cladosporium</i> , Leveduras, <i>Aspergillus</i> , <i>Aureobasidium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Basidiomycota</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Acremonium</i> , <i>Ulocladium</i> , <i>Scopulariopsis</i> , <i>Geotrichum</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Botryosphaeria</i> , <i>Chalara</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Sclerotinia</i> e <i>Epicoccum</i>	293 - 428
Valeriani et al (2017)	Itália	4 estações	Biblioteca universitária	VM e VN	Não definido	Não definido	Ativa/Passiva	Impacto /SP	SDA	<i>Penicillium</i> , <i>Cladosporidium</i> e <i>Fusarium</i>	VM: 18,6 VN: 417
Sahab et al (2014)	Egito	Inverno, Primavera e Verão	Repositório Nacional e Arquivo Público	VN	44% - 55%	20°C	Passiva	SP	PDA	<i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Mucar</i> , <i>Penicillium</i> e <i>Trichoderma</i>	VN: 125,8-267,3 SV: 94,35 - 369,58
Skóra et al (2015)	Polónia	Inverno	Museus, Bibliotecas e Arquivos	VN	47% - 53%	18°C - 22°C	Ativa	Impacto	DG 18 e MEA	<i>Acremonium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Aureobasidium</i> , <i>Beauveria</i> , <i>Botrytis</i> , <i>Chrysonilia</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Epicoccum</i> , <i>Glilocladium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Ulocladium</i> e <i>Cryptococcus</i>	ND
Pyrri et al (2020)	Grécia	4 estações	Biblioteca Nacional	VM e VM	37,4%- 57,6%	14,9 °C - 32,4°C	Ativa	Impacto	MEA	<i>Acremoniton</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Arthrinium</i> , <i>Aureobasidium</i> , <i>Emericella</i> , <i>Eurotium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Geotrichum</i> , <i>Mortierella</i> , <i>Myrothecium</i> , <i>Nigrospora</i> , <i>Paecilomyces</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Phoma</i> , <i>Sclerotinia</i> , <i>Scopulariopsis</i> , <i>Spiniger</i> , <i>Stachybotrys</i> , <i>Stemphylium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Trichothecium</i> , <i>Spaeropsidales</i> , <i>Zygomycota</i> , <i>Basidiomycota</i> e <i>Leveduras</i>	180 - 410
Kadaifciler (2017)	Turquia	4 estações	Biblioteca universitária	Natural	29,62% - 61,11%	19,34 °C - 27,64°C	Ativa	Impacto	DG 18	<i>Acremonium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Chaetomium</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Phoma</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Talaromyces</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Ulocladium</i> e <i>Dematiaceous</i>	0-310

ND – Não defenido; VN – ventilação natural; VM – ventilação mecânica; Sem ventilação – SV; SP – sedimentação passiva; SDA – Sabouraud Dextrose agar, PDA; Potato Dextrose agar; MEA – Malt Extract agar; DG 18 - Dichloran-glycerol agar.

2.4.7.2 Bactérias

As bactérias são organismos unicelulares e procarióticos, podendo ocorrer isoladamente ou em colônias. Embora as bactérias não apresentem o mesmo nível de agressividade na biodeterioração de papel como os fungos, algumas são capazes de produzir ácidos orgânicos e enzimas que atuam sobre a estrutura do papel, tintas e materiais de encadernação (Gupta et al., 2012; Schwarz, 2001). De acordo com Gutarowska (2013), a presença bacteriana pode acarretar abrasão, descoloração de objetos e enrijecimento das fibras do papel, sendo, desta forma, um parâmetro importante de monitorização para a garantia da preservação do acervo.

A Tabela 13 apresenta a síntese de trabalhos desenvolvidos a partir da monitorização bacteriana em bibliotecas e arquivo. Assim como observado na literatura sobre a presença fúngica em ambientes como bibliotecas, museus e outras instituições que armazenam importantes documentos, a presença bacteriana também apresenta grande variabilidade de faixas de concentração e de gêneros observados. Essa diversidade pode resultar de inúmeros fatores, como: características térmicas dos interiores, taxa de ocupação, características da ventilação da edificação, microbiota local, metodologia de amostragem, época do ano, entre outros. Apesar disso, observou-se uma predominância de três gêneros, sendo eles: *Staphylococcus*, *Bacillus* e *Pseudomonas*.

Tabela 13 Presença bacteriana descritas em bibliotecas, museus, repositórios e arquivos

Autores	País	Época do ano	Local de estudo	Tipo de ventilação	Humidade do ar (%)	Temperatura (°C)	Tipo de amostragem	Método de amostragem	Meio de cultivo*	Gêneros de bactérias encontrados	Concentração observada (UFC /m³)
Hayleeyesus & Manaye (2014)	Etiópia	Primavera	Biblioteca universitária	ND	ND	ND	Passiva	SP	NA	<i>Micrococcus</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Bacillus</i> e <i>Neisseria</i>	367 - 2.595
Hassan et al (2021)	Paquistão	Inverno	Biblioteca pública	VM e VN	VM: 48% – 58% VN: 41 % - 58%	VM: 15°C - 19°C VN: 19°C - 26°C	Ativa	Filtragem	TSA	<i>Staphylococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcu</i> e <i>Lysinibacillus</i>	Ventilação mecânica: 30-230 Ventilação natural: 30-180
Valeriani et al (2017)	Itália	Inverno, primavera, verão e outono	Biblioteca universitária Biblioteca científica	VM e VN	ND	ND	Ativa/Passiva	Impacto/ SP	TSA	<i>Janthinobacterium</i> , <i>Enterococcus</i> , <i>Brevibacterium</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Microbacterium</i> , <i>Kocuria</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Acinetobacter</i> , <i>Rathayibacter</i> , <i>Enhydrobacter</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Macrococcus</i> , <i>Pedobacter</i> , <i>Arthrobacter</i> , <i>Paracoccus</i> , <i>Sodalis</i> , <i>Pseudomonas</i> e <i>Staphylococcus spp.</i>	Ventilação mecânica: 143,3 Ventilação natural: 235,5
Skóra et al (2015)	Polónia	Inverno	Museus, Bibliotecas e Arquivos	VN	47% - 53%	18°C - 22°C	Ativa	Impacto	TSA	<i>Bacillus</i> , <i>Kocuria</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Nocardia</i> , <i>Pseudomonas</i> e <i>Staphylococcus</i>	Não definido
Cappitelli et al.(2009)	Itália	Primavera	Arquivo histórico	VN	46% - 60%	22°C	Ativa	Impacto	PCA	ND	308 – 2.116

ND – Não definido; VN – ventilação natural; VM – ventilação mecânica; Sem ventilação – SV; SP – sedimentação passiva; NA – Nutrient agar; TSA - Tryptone soya agar, PCA – Plate Count agar

3. Metodologia

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma detalhada, a descrição da área de estudo, os procedimentos metodológicos e o tratamento de dados. A área de estudo é descrita com base nas principais características do ambiente analisado, abordando aspetos de uso e ocupação do espaço, bem como as dimensões do local e elementos interiores e exteriores relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, explica-se como foi realizada a recolha/monitorização da informação sobre o ambiente, incluindo os critérios de seleção e os materiais e métodos utilizados para a monitorização dos poluentes físico-químicos. Também são detalhados os materiais e métodos empregados para a colheita de dados microbiológicos e para a análise de DNA das amostras. O capítulo prossegue com a descrição do tratamento dos dados obtidos. Por fim, são apresentados os principais parâmetros que orientaram a avaliação da conformidade legal dos resultados.

3.1 Local de Estudo

O Instituto Politécnico de Bragança (IPB) possui cinco bibliotecas, sendo elas: Biblioteca da Escola Superior Agrária (ESA), Biblioteca da Escola Superior de Saúde (ESSa), Biblioteca da Escola Superior de Comunicação, Administração e Turismo (EsACT), Biblioteca da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) e Biblioteca da Escola Superior de Educação (ESE).

A biblioteca da ESA encontra-se no edifício central da Escola Superior Agrária situada no campus de Santa Apolónia em Bragança (Figura 3). Este espaço desempenha um papel fundamental na gestão e organização das publicações científicas, oferecendo serviços de pesquisa bibliográfica, gerenciamento do empréstimo de publicações e disseminação de informações através de diversos produtos e serviços (ESA-IPB, 2023). Entre os frequentadores deste espaço estão os usuários da instituição (incluindo alunos, docentes, investigadores e funcionários) e a usuários externos, que não fazem parte da comunidade académica do IPB (IPB, 2013).

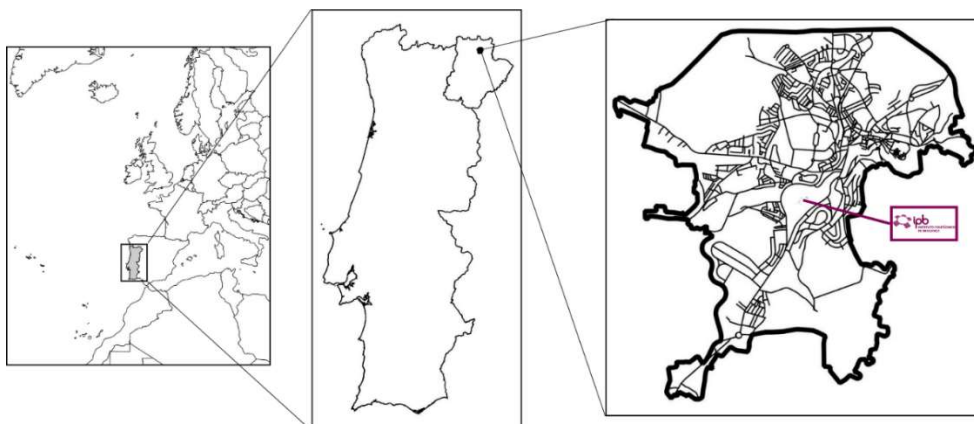


Figura 3 Localização do local de estudo

A biblioteca da ESA possui uma área total de 627,23 m² e está instalada numa edificação construída na década de 1980 (Figura 4). Ao longo dos anos, o espaço foi alvo de várias intervenções de reabilitação, sendo a mais recente realizada em 2011. Esta última intervenção teve como principal objetivo a substituição dos revestimentos, a pintura dos espaços e a atualização dos equipamentos da biblioteca.



Figura 4 Planta da Biblioteca da ESA

O sistema de climatização da biblioteca mantém, essencialmente, a mesma configuração desde a construção original do edifício, sendo composto por uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA). Este sistema é responsável pelo controlo da temperatura e pela renovação do ar durante o horário de funcionamento da biblioteca (9h00 às 19h30). Durante os meses mais frios, o sistema é configurado para aquecimento, mantendo as temperaturas entre 20 °C e 21 °C. Para além do controlo da temperatura, não são monitorizados ou regulados outros parâmetros ambientais. As manutenções do sistema são realizadas de forma periódica, com frequência semestral. Este sistema abrange todos os compartimentos da biblioteca, com exceção do depósito de livros.

No teto da biblioteca, observam-se duas tubulações principais que se ramificam em condutas perpendiculares. Do lado esquerdo do edifício situam-se as tubulações responsáveis pela insuflação do ar, enquanto do lado direito estão as destinadas à exaustão. Parte do ar extraído pelo sistema de exaustão é conduzida para o exterior do edifício, enquanto outra parte é recirculada, sendo misturada com uma nova parcela de ar exterior filtrado, de forma a evitar a introdução de partículas grosseiras. O aquecimento do ar é realizado por meio de caldeiras.

A limpeza da biblioteca é efetuada diariamente entre as 6h00 e as 8h00, período durante o qual as portas centrais permanecem abertas. A limpeza inclui a recolha de resíduos sólidos, a limpeza das

estantes com panos húmidos, o varrimento do chão com mopa seca, seguido da lavagem com mopa húmida. A lavagem do chão com a mopa húmida utiliza um produto intitulado “lava-tudo”, diluído em água (60 mL do produto para 10 L de água). O produto é composto por água, tensoativos não iónicos e álcoois. Os locais com maior acumulação de poeira são as estantes e o móvel que separa o corredor da sala de leitura. Para além desta rotina diária, durante o período de férias realiza-se uma limpeza mais detalhada e profunda de todo o espaço da biblioteca.

A ocupação da biblioteca é bastante variável. De forma geral, o horário de maior utilização ocorre diariamente entre as 16h00 e as 19h00, principalmente entre terça e quinta-feira. A ocupação intensifica-se durante os períodos de avaliação académica, quando o número de utilizadores aumenta significativamente. Estes períodos ocorrem duas vezes por ano: o primeiro entre janeiro e fevereiro e o segundo entre junho e julho.

3.2 Pontos de amostragem

O objetivo principal desta pesquisa é a caracterização da qualidade do ar no interior da biblioteca da ESA. Diante disso a escolha dos pontos de amostragem é crucial para a representação adequada do espaço. Para a definição dos compartimentos que receberiam pontos de amostragem foram observados alguns aspetos: a relevância do espaço para o funcionamento da biblioteca; a permanência e o fluxo de ocupantes nestes espaços; e a possibilidade técnica de instalar a estação de monitoramento físico-químico e realização das amostragens microbiológicas.

Neste contexto, optou-se pela monitorização de quatro dos sete compartimentos da biblioteca. As principais características destes espaços e os seus respetivos pontos de amostragem encontram-se descritas na Tabela 14.

Tabela 14 Caracterização dos compartimentos selecionados

Compartimento da biblioteca	Função principal do espaço	Pontos de amostragem
Depósito de livros	Armazenamento do acervo da biblioteca que apresenta restrições de acesso ao público; Espaço de apoio utilizado pelas funcionárias para aquecimento de refeições.	A4 e A8
Sala de leitura I	Desenvolvimento de atividades académicas (individuais); Armazenamento o acervo da biblioteca disponível ao público; Realização de eventos formativos.	C1, C2 e C3
Sala de leitura II	Desenvolvimento de atividades académicas (individuais ou coletivas); Armazenamento o acervo da biblioteca disponível ao público.	G7
Gabinete I	Desenvolvimento de atividades administrativas pelas funcionárias da biblioteca.	G5

Na escolha da localização dos pontos de amostragem dentro de cada compartimento procurou-se garantir a representatividade local e o cumprimento das normas de amostragem (ISO 16.000-1:2006), bem como impactar o mínimo possível as atividades desenvolvidas no interior da biblioteca.

De acordo com a norma ISO 16000-1:2006, o local mais indicado para o posicionamento de um amostrador é no centro da sala, mas caso isso não seja possível o ideal é que o equipamento seja colocado a pelo menos 1 m de qualquer obstáculo, como paredes ou estantes. Além disso, a norma coloca com altura ideal para a amostragem de 1 m a 1,5 m do piso, uma vez que essa é a altura aproximada da zona respiratória média das pessoas.

A Figura 5 apresenta a localização espacial dos pontos de amostragem dentro de cada compartimento.



Figura 5 Esquema da localização dos pontos de amostragem

3.2.1 Depósito de livros

O Depósito de livros possui uma área total de 140,52 m² e um pé-direito de aproximadamente 4 metros. Tem como função principal o armazenamento de livros não disponíveis para livre acesso do público. Além disso, o ambiente também serve como apoio para o aquecimento de refeições pelas funcionárias. O acesso é restrito aos funcionários da biblioteca. O espaço não é comumente ocupado, não havendo cadeiras ou mobiliário destinado ao uso prolongado por pessoas. No que diz respeito à estrutura física do ambiente, as paredes são pintadas com tinta acrílica, e o piso é cerâmico do tipo lajota, com acabamento liso, mas levemente antiderrapante. O depósito conta com duas portas: uma estabelece ligação com a Sala de Leitura I e a outra dá acesso direto ao exterior da edificação. Além

disso, existem duas janelas duplas, que contribuem para a iluminação. Durante todo o período de estudo as janelas mantiveram-se fechadas.

No que diz respeito ao mobiliário, o compartimento apresenta maioritariamente estantes metálicas, embora também se observe estantes e anteparos de compensado. Os materiais armazenados incluem livros, revistas, mapas e materiais audiovisuais, parte dos quais estão expostos, enquanto o restante se encontra organizado em caixas sobre as estantes.

Ao contrário dos outros compartimentos da biblioteca, o depósito de livros não dispõe de climatização artificial. A ventilação e os parâmetros de conforto térmico são influenciados predominantemente por infiltrações de ar exterior, principalmente por meio da porta sem vedação que comunica com o exterior e da porta interna que liga o espaço à Sala de Leitura I.

Um ponto crítico identificado neste ambiente diz respeito às tubulações de águas residuárias, havendo relatos de problemas com vazamentos recorrentes, o que representa um risco para a integridade dos materiais armazenados e para a salubridade do ambiente.

3.2.2 Sala de leitura I

A Sala de Leitura I é o maior ambiente estudado. Possui uma área total de 285,10 m² e um pé-direito de aproximadamente 4 metros. Esse espaço possui múltiplos usos sendo utilizado para realização de atividades académicas individuais, armazenamento do acervo disponível ao público e promoção de eventos formativos. A capacidade máxima do espaço, na sua configuração habitual, é de 54 pessoas.

Em relação às características construtivas do espaço, observa-se a presença de piso revestido em cortiça, o que contribui para o conforto térmico e acústico do ambiente. Além disso, as paredes são pintadas com tinta acrílica. O ambiente dispõe de nove janelas e conta com claraboias, que favorecem a iluminação natural do espaço. Durante todo o período de estudo as janelas mantiveram-se fechadas. Existem portas de ligação deste ambiente com os gabinetes, o depósito de livros e o hall de entrada da biblioteca, garantindo a integração funcional com as demais áreas da edificação.

O mobiliário é composto por 54 secretárias, fabricadas em compensado com estrutura metálica e cadeiras estofadas em material sintético. Há também a presença de mesas de compensado para que os ocupantes coloquem os livros retirados das estantes. Os livros presentes neste ambiente são expostos em estantes feitas de compensados. Além dos livros, jornais e revistas também estão disponíveis para a consulta dos ocupantes. O ambiente apresenta ainda a presença de cinco vasos com plantas.

3.2.3 Sala de leitura II

A Sala de Leitura II possui uma área total de 34,24 m² e um pé-direito de aproximadamente 3 metros. Este espaço é destinado ao desenvolvimento de atividades acadêmicas, individuais e coletivas, e ao armazenamento do acervo da biblioteca disponível ao público.

O piso é revestido em cortiça e as paredes são pintadas com tinta acrílica. O ambiente conta com quatro janelas, que favorecem a iluminação natural, além de portas que ligam a sala de leitura ao hall de entrada da biblioteca. Durante todo o período de estudo as janelas mantiveram-se fechadas. As divisórias entre a Sala de Leitura II e o Gabinete I, bem como entre esta e a Sala de Leitura I, são feitas em vidro. Sendo importante destacar a existência de uma abertura que permite a circulação de ar entre a Sala de Leitura II e o Gabinete I, influenciando na ventilação do espaço.

A ocupação máxima da sala é de 16 pessoas. O mobiliário é composto por quatro mesas em compensado e dezasseis cadeiras metálicas com revestimento em material sintético. O ambiente dispõe ainda de estantes em compensado, utilizadas para o reposicionamento de livros e revistas.

3.2.4 Gabinete I

O Gabinete I é o menor dos ambientes estudados, com uma área total de 26,64 m² e um pé-direito de aproximadamente 3 metros. Este espaço é utilizado principalmente para o desenvolvimento de atividades administrativas da biblioteca. A capacidade máxima no momento das medições foi de 6 pessoas.

O mobiliário deste espaço é composto por cinco secretárias, acompanhadas de estantes destinadas ao armazenamento de papéis e demais materiais de uso administrativo. As divisórias do ambiente são em vidro. Destaca-se que, na divisão entre a Sala de Leitura II e o Gabinete I, as divisórias não se fecham completamente até o teto, o que permite troca de ar entre os ambientes. O piso é revestido em cortiça, contribuindo para o conforto térmico e acústico, e as paredes são pintadas com tinta acrílica, de acabamento fosco. O espaço conta com três janelas, que foram mantidas fechadas durante todo o período de desenvolvimento da pesquisa. Além disso, o ambiente conta com equipamentos de ar condicionado do tipo split e aquecedores portáteis. Assim como na sala de leitura I, o espaço conta com vasos de plantas.

3.3 Levantamento de dados da área de estudo

A etapa de levantamento de dados sobre a área de estudo ocorreu por meio de conversas com representantes: do Serviço de Documentação e Bibliotecas do IPB, do Setor de Obras da ESA e do Setor de Manutenção e Conservação da ESA. Para cada conversa, foi utilizado um roteiro com o objetivo de sistematizar a recolha de informações. Apesar disso, as questões abordadas não se restringiram apenas as descritas no roteiro, visto que durante a conversa alguns pontos novos surgiam.

A conversa com o Serviço de Documentação e Bibliotecas do IPB ocorreu de forma preliminar, antes do início das medições, e teve como objetivo mapear os principais problemas observados pela equipa de funcionárias da biblioteca, bem como avaliar as possibilidades de implementação dos pontos de amostragem. Esta reunião foi fundamental para a definição das estratégias de medição e para a delimitação da pesquisa.

Já as conversas com o Setor de Obras e com o Setor de Manutenção e Conservação realizaram-se após a recolha dos dados e tiveram como objetivo procurar explicações para os padrões e características observados a partir da análise dos dados. Com o Setor de Obras, foram tratados temas como o funcionamento do sistema de climatização e ventilação da biblioteca, bem como o histórico do edifício. Com o Setor de Manutenção e Conservação, foram abordados aspetos relativos aos processos de limpeza deste ambiente, com foco na discussão sobre os produtos utilizados e a frequência da limpeza.

Para além das conversas, uma parte importante do levantamento de dados sobre a área de estudo foi realizada através da solicitação de documentos, como plantas baixas e cortes das áreas analisadas.

3.4 Monitorização dos parâmetros físico-químicos

Durante a campanha de monitorização dos parâmetros físico-químicos, foram mensuradas as concentrações de CO, CO₂, CH₂O, COV e material particulado (PM), nomeadamente: PM_{2,5} e PM₁₀. Além disso, foram recolhidos dados sobre a temperatura do ar, humidade relativa e pressão atmosférica.

Com o intuito de observar o comportamento dos parâmetros ao longo das estações do ano, realizaram-se três campanhas de medição. A primeira ocorreu no outono, entre os dias 10 e 16 de dezembro de 2024. Complementarmente, foi realizada uma amostragem extra no dia 19 de dezembro de 2024, com o objetivo de aumentar o tamanho da amostra de dados. Durante esta campanha, a estação de monitorização foi movida a cada duas horas entre os pontos de amostragem durante o período de funcionamento da biblioteca. Após o encerramento da biblioteca, a estação continuou a monitorização durante a noite e a madrugada em um dos pontos de amostragem.

A campanha de inverno aconteceu entre os dias 24 de fevereiro e 6 de março de 2025. No entanto, devido a problemas técnicos, os dados relativos às concentrações de gases, temperatura e humidade relativa foram perdidos. Desta forma, foi necessária a realização de uma campanha adicional entre os dias 18 e 20 de março de 2025. Essa campanha decorreu da mesma forma que a campanha de outono: a estação de monitorização foi movida a cada duas horas entre os pontos de amostragem e, durante o período noturno, mantinha-se ativa em um dos pontos.

Por fim, a campanha da primavera decorreu entre os dias 25 de março e 2 de abril de 2025, contando ainda com uma medição extra no dia 8 de abril de 2025, visto que durante a semana ocorreram episódios de chuva que impossibilitaram as medições no exterior. Durante essa campanha,

a estação de monitorização mantinha-se 24 horas em cada ponto de amostragem, a fim de observar as curvas de comportamento dos pontos e suas variações ao longo do dia.

Para além das medições no interior, foram realizadas medições no exterior da edificação com o objetivo de recolher dados sobre as concentrações médias dos poluentes. A monitorização do exterior da edificação ocorria diariamente, quando os fatores meteorológicos o permitiam, e tinha duração de 30 minutos.

3.4.1 Equipamentos utilizados

A monitorização dos parâmetros físico-químicos foi realizada a partir de três equipamentos: Handheld PC-3016A da Graywolf Sensing Solutions; Direct Sense XM da Graywolf Sensing Solutions; e AdvancedSense® DSII-8 da Graywolf Sensing Solutions. O Handheld PC-3016A foi utilizado para a monitorização da concentração de PM_{2,5} e PM₁₀. A Tabela 15 apresenta o princípio de funcionamento, a faixa de medição e a precisão do equipamento. Este equipamento opera com uma taxa de amostragem de 0,1 CFM (aproximadamente 0,0472 L/s).

Tabela 15 Princípio de medição, faixas de medição e precisão do Handheld PC-3016A

Parâmetro monitorado	Princípio de medição	Faixa de medição	Precisão
Material Particulado	Dispersão de luz (laser)	0, 3 – 10 µm	50% (partículas <0,3 µm) 100% (partículas >0,45 µm)

O Direct Sense XM foi utilizado para monitorizar a temperatura, humidade relativa do ar, COV, CO, CO₂ e CH₂O. A Tabela 16 apresenta os princípios de funcionamento dos sensores, as faixas de medição e a respetiva precisão.

Tabela 16 Princípio de medição, faixa de medição e precisão do Direct Sense XM

Parâmetro monitorado	Princípio de medição	Faixa de medição	Precisão
CO ₂	Sensor infravermelho não dispersivo (NIDR)	0 - 10.000 ppm	± 1ppm (350 ppm-2000ppm) ± 35 ppm (>2000ppm)
COV	Fotoionização (PID)	0 - 20.000 ppb	5 ppb
CO	Eletroquímico	0 - 500 ppm	± 1 ppm
CH ₂ O	Eletroquímico	0 - 1 ppm	0,05 ppm
Temperatura	Termoresistência (Pt 1000)	-25°C – 70°C	± 0,3°C
Humidade Relativa	Sensor capacitivo	0 – 100%	± 2% (RH<80%) ± 3% (RH>80%)

Por fim, o AdvancedSense® DSII-8 foi conectado a ambos os equipamentos com o objetivo de acompanhar a recolha e promover a compilação dos dados monitorizados. Além dos equipamentos, foi necessária a utilização de um tripé para garantir que os sensores permanecessem a 1,5 metros do solo, conforme estabelecido pela norma ISO 16000-1:2006.

3.4.2 Levantamento de informações sobre as condições de medição

Para registo das condições locais durante a colheita de amostras, foi elaborado um questionário (Anexo A), preenchido pelo pesquisador no momento de cada medição. O questionário cobre cinco tópicos: informações gerais; inspeção visual do edifício; condições de medição; controlo de ocupantes no compartimento; e comentários e observações adicionais. Esse questionário teve como objetivo fundamentar a análise dos resultados observados pela monitorização dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

3.4.3 Avaliação das condições meteorológicas

De acordo com a classificação climática de Köppen, a cidade de Bragança enquadra-se no tipo Csb, caracterizado como um clima temperado com verões secos e invernos suaves (IPMA, 2024). As principais características desse tipo climático incluem: temperaturas médias nos meses mais frios entre -3°C e 18°C ; verões relativamente secos, com precipitação inferior a 40 mm; verões longos e frescos, com médias mensais inferiores a 22°C ; e pelo menos quatro meses por ano com temperaturas médias superiores a 10°C (Câmara Municipal de Bragança, 2020).

O acompanhamento das condições meteorológicas do exterior da edificação foi realizado a partir dos dados coletados pela Estação Meteorológica da Escola Superior Agrária do IPB. A estação encontra-se no IPB campus Santa Apolónia em Bragança, cerca de 200 m da biblioteca (Figura 6).



Figura 6 Localização da Estação Meteorológica da ESA

Na Tabela 17 são apresentadas as faixas de temperatura e humidade relativa monitorizadas pela estação meteorológica durante os meses estudados. A menor temperatura média monitorizada pela estação meteorológica foi de 3,3°C no outono, por outro lado a maior foi observada na primavera 11,5°C. No que tange a HR, observou-se o comportamento contrário, no outono a HR média foi de 71,48%, enquanto na primavera foi de 44,8%.

Tabela 17 Faixas de Temperatura e HR registadas no exterior

Campanhas	Faixa de Temperatura	Média de Temperatura	Faixa de HR	Média de HR
Outono	-4,7°C - 12,4°C	3,3°C	52% - 78%	71,8%
Inverno	6,7°C - 14,8°C	10,4°C	41% - 57%	49,3%
Primavera	0,2°C - 23,2°C	11,5°C	26% - 67%	44,8%

3.5 Monitorização dos parâmetros microbiológicos

As campanhas de monitorização dos parâmetros microbiológicos decorreram em paralelo com as medições dos parâmetros físico-químicos. Estas campanhas foram organizadas com base nas amostragens realizadas em dois períodos do dia: matutino (entre as 09h00 e as 10h30) e vespertino (entre as 16h30 e as 18h00), ao longo de três dias consecutivos. A amostragem foi realizada em triplicado em cada ponto de amostragem. Durante as campanhas microbiológicas, foram registados o nível de ocupação de cada compartimento da biblioteca no momento da medição, bem como os horários de cada colheita.

A campanha de outono teve lugar entre os dias 11 e 13 de dezembro de 2024; a de inverno, entre 25 e 27 de fevereiro de 2025; e, por fim, a campanha de primavera foi realizada entre os dias 27 e 31 de março de 2025.

3.5.1 Equipamentos para a monitorização de parâmetros microbiológicos

Para a realização dos ensaios microbiológicos, foi utilizado o método de amostragem por impacto sólido, assistido por um amostrador ativo, sendo o modelo utilizado o VWR® SAS Super DUO 360 Air Samplers. Este equipamento possui duas cabeças de amostragem, permitindo a recolha de duas amostras em simultâneo. O caudal de amostragem do equipamento é de 180 L/min.

Para o presente estudo, o equipamento foi posicionado em cada ponto de amostragem e mantido a aproximadamente 1,5 metros do solo. O amostrador foi configurado para recolher 200 litros de ar, volume recomendado pelo fabricante para ambientes comuns, como residências e laboratórios.

Para a quantificação de bactérias totais, foi utilizado o meio de cultura Plate Count Agar (PCA, Liofilchem, Italy) com adição de 500 mg/L cicloheximida (Merck - Darmstadt) para inibir o crescimento de fungos. Para a medição da quantidade total de fungos, empregou-se o meio Rose Bengal

Chloramphenicol Agar (RBC, Liofilchem, Italy). Após a amostragem, as placas foram transportadas para o laboratório e incubadas em estufa a 37 °C e 25 °C, respectivamente para bactérias e para fungos.

Após o período de incubação, o número de colônias presente em cada placa foi contabilizado e corrigido com base na tabela de conversão fornecida pelo fabricante do amostrador (Anexo B). A quantificação corrigida expressa a contagem provável (Pr), utilizada para o cálculo do número de Unidades Formadoras de Colônias (UFC) por metro cúbico de ar amostrado, conforme apresentado na Equação 1.

$$UFC = \frac{Pr \cdot 1000}{\text{Volume de ar coletado pelo amostrador}} \quad (\text{Equação 1})$$

3.5.2 Caracterização microbiológica

Em conjunto com a contagem total de colônias, procedeu-se à identificação e quantificação dos diferentes tipos de colônias observadas, com base na análise das suas características fenotípicas (cor, tamanho, forma, margem e elevação). Durante as campanhas não foram detetados o desenvolvimento de colônias de bactérias nas placas PCA. Diante disso, o processo de identificação foi realizado apenas para os fungos encontrados.

A partir dessa categorização, com o objetivo de obter culturas puras, foi selecionada uma colônia representativa de cada grupo, que foi então repicada no meio de cultura Potato Dextrose Agar (Liofilchem, Italy). No total, foram isoladas 27 colônias, apresentadas na Figura 7.

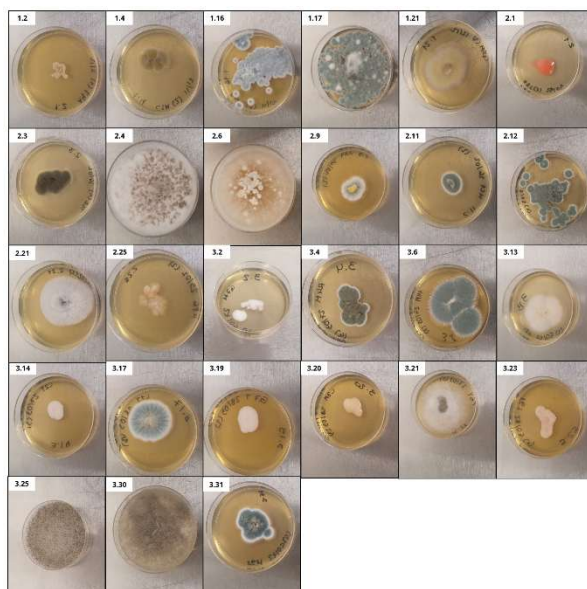


Figura 7 Cólônias de fungos isoladas

3.5.2.1 Extração do DNA

A extração do DNA genómico foi realizada com recurso ao kit de extração REExtract-NAmp™. Alíquotas de colónias puras foram adicionadas a 25 µL da solução de extração e, em seguida, colocadas no termociclador durante 10 minutos a 95 °C. Após a incubação, foram adicionados 50 µL da solução de diluição a cada amostra.

3.5.2.2 Amplificação do DNA

A identificação de fungos isolados foi realizada por meio da amplificação e sequenciação de regiões específicas do DNA ribossomal (rDNA), utilizando-se a região Espaçadora Transcrita Interna (ITS), recorrendo aos primers universais ITS1 e ITS4. A Tabela 18 apresenta os componentes, concentrações e volumes utilizados para a amplificação do DNA da amostra.

Tabela 18 Componentes e volumes utilizados para a reação de PCR de µL

Componentes	Volume (µL)	Concentração final
H ₂ O destilada	12,3	-
Tampão da reação (5X)	4	1x
Primer forward (ITS1 10 µM)	0,4	0,2
Primer reverse (ITS4 10 µM)	0,4	0,2
dNTP's (10 µM)	0,4	0,2
BSA (3 mg/mL)	0,4	60 µg/L

Após a preparação da mistura, foram adicionados 2 µL da extração de DNA da amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas no termociclador, com o seguinte perfil térmico: desnaturação inicial a 95 °C durante 5 minutos, seguida por 34 ciclos de desnaturação a 95 °C por 40 segundos, anelamento (emparelhamento) a 53 °C por 40 segundos e extensão a 72 °C por 45 segundos. Finalizou-se com uma extensão final a 72 °C por 7 minutos (único ciclo), e posteriormente a conservação das amostras a 4 °C.

3.5.2.3 Análise das seqüências de DNA

A confirmação da amplificação foi realizada por eletroforese em gel de agarose a 1%, com aplicação de 110 V, permitindo verificar a presença da banda esperada do DNA. Amostras sem amplificação visível foram repetidas. Os produtos confirmados foram sequenciados pela Macrogen Inc., com os mesmos primers utilizados na PCR. Os resultados da eletroforese estão representados na Figura 8, permitindo a visualização das bandas amplificadas.

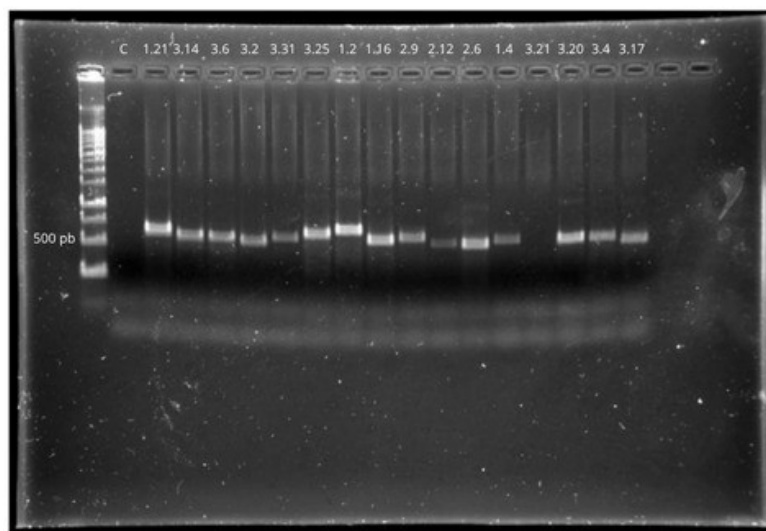


Figura 8 Resultado do PCR em gel de agarose 1%

A análise das sequências de DNA obtidas foi realizada com o auxílio do software Geneious Prime, que permitiu a remoção de sobreposições entre bandas resultantes do sequenciamento. Após este processamento, as sequências limpas foram comparadas com dados da base de dados do NCBI (National Center for Biotechnology Information), utilizando o algoritmo BLAST para a identificação molecular. Para a classificação dos isolados, consideraram-se os critérios de maior percentagem de identidade e menor valor esperado (E-value). Quando a similaridade era superior a 99%, foram atribuídos tanto o género quanto a espécie. Nos casos com percentagens entre 98% e 99%, foi considerado apenas o género. Já as sequências com identidade inferior a 97% foram classificadas como não identificadas. Quando os resultados apontaram para o mesmo género, mas com espécies distintas, também se optou por considerar apenas o género (Anexo C).

3.6 Tratamento dos dados

3.6.1 Pré processamento dos dados

A etapa de pré-processamento dos dados teve como objetivo a organização e estruturação dos dados para posterior análise. O primeiro passo consistiu na organização das informações em folhas de cálculo no Microsoft® Excel 2010, sendo os dados divididos de acordo com os respetivos pontos de amostragem. Em seguida, procedeu-se à limpeza dos dados, eliminando erros ou valores fora do formato esperado, bem como à verificação da existência de dados em falta.

3.6.2 Processamento dos dados

A etapa de processamento dos dados foi dedicada à avaliação estatística dos valores obtidos e à elaboração de gráficos e esquemas ilustrativos. Após o pré-processamento, calcularam-se as médias horárias para todos os parâmetros de interesse em cada ponto de amostragem.

Posteriormente, os dados foram importados para o software Jamovi, no qual foram realizadas as seguintes análises estatísticas: Estatísticas descritivas (média, desvio padrão, valores máximo e mínimo); Avaliação da normalidade amostral, através do teste de Shapiro-Wilk; Testes de comparação de médias; Análise de correlação entre variáveis.

Relativamente à distribuição dos dados, observou-se a predominância de variáveis com comportamento não paramétrico. Por esse motivo, optou-se pela aplicação do teste de Kruskal-Wallis para a comparação de médias, complementado pelo pós-teste de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner. Esta combinação permitiu identificar diferenças significativas no comportamento e na distribuição dos dados entre os diferentes grupos analisados. Adicionalmente, considerando a natureza não paramétrica dos dados, a análise de correlação entre os parâmetros foi realizada com recurso ao coeficiente de Spearman. Para assegurar a fiabilidade estatística dos resultados, todas as análises adotaram um nível de significância de $p < 0,05$.

Todos os gráficos e representações visuais decorrentes das análises estatísticas foram elaborados no software Microsoft® Excel 2010, a partir dos resultados obtidos no Jamovi.

3.6.3 Cálculo da razão interior-exterior

A realização de uma caracterização completa da Qualidade do Ar Interno (QAI) requer a medição conjunta de parâmetros físico-químicos tanto no interior quanto no exterior das edificações. Isso permite compreender o comportamento e a origem dos poluentes. Nesse contexto, o cálculo da razão Interior/Exterior (I/E) é utilizado para determinar se a concentração de determinado poluente no ambiente interno se origina de fontes internas ou externas (Nunes, 2014). Quando a razão I/E é superior a 1, isso indica a presença de fontes internas de poluição, enquanto valores inferiores a 1 sugerem que a poluição tem origem externa (Mentese et al., 2012). A razão interior/exterior é calculada de acordo com a fórmula apresentada na Equação 2.

$$\frac{I}{E} = \frac{\text{Concentração do poluente no interior}}{\text{Concentração do poluente no exterior}} \quad (\text{Equação 2})$$

3.6.4 Cálculo da ventilação

A taxa de ventilação de renovação do ar por hora (ACH) foi calculada de forma indireta, com base nas variações da concentração de CO₂ observadas no interior dos espaços analisados. O método do decaimento de CO₂ foi aplicado para a estimativa da taxa de ventilação em ambientes desocupados, avaliando-se a redução da concentração ao longo do tempo. Este método foi utilizado para os períodos

noturnos e para o depósito de livros, uma vez que se trata de local sem ocupação mesmo durante o dia. A fórmula utilizada para este cálculo está descrita na Equação 3

$$ACH = \frac{\ln(C_i) - \ln(C_f)}{t} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: ACH - Taxa de renovação do ar (h^{-1}); C_i - Concentração inicial de CO_2 (ppm); C_f - Concentração final de CO_2 (ppm); T - intervalo de tempo entre as duas medições (h).

Para o cálculo da taxa de ventilação durante o horário de funcionamento da biblioteca, foi utilizado o método do estado estacionário (Steady-State Method), conforme descrito na Equação 4. A caudal de ventilação obtida (Q , em L/s) foi posteriormente convertida em taxa de renovação do ar (ACH), conforme a Equação 5.

$$Q = \frac{G}{C_i - C_o} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: Q – Caudal de ventilação (m^3/s); G - Taxa de geração de CO_2 (m^3/s); C_i - Concentração interior de CO_2 (m^3/m^3); C_o - Concentração exterior de CO_2 (m^3/m^3).

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: ACH - Taxa de renovação do ar (1/h); Q - Taxa de ventilação (m^3/h); V - Volume do ambiente (m^3).

3.6.5 Avaliação do conforto térmico

O conforto térmico dos ocupantes foi avaliado com base no diagrama simplificado de conforto térmico disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - Brasil). O diagrama correlaciona os valores de humidade relativa e de temperatura do ar para descrever a sensação térmica dos indivíduos. Embora trate-se de um método mais simples, ele permite a caracterização adequada das condições de conforto. A Figura 9 apresenta o diagrama em questão.



Figura 9 Diagrama de conforto térmico disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia

Fonte: INMET (2019)

3.6.6 Cálculo da diversidade microbológica

Para a avaliar a diversidade microbológica das amostras de ar interior, aplicou-se o Índice de Diversidade de Simpson (1-D), que tem como objetivo quantificar a diversidade de espécies com base na riqueza e na abundância relativa de espécie. O cálculo foi realizado a partir da Equação 6.

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: S - número total de grupos identificados; pi - percentagem do grupo i em relação ao total de microrganismos presentes

3.7 Avaliação da conformidade legal

3.7.1 Poluentes físico-químicos

A seleção dos parâmetros físico-químicos a serem monitorizados baseou-se nas exigências legais estabelecidas pela Portaria n° 138-G/2021. As concentrações mensuradas incluíram: Material Particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm (PM₁₀), Material Particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}), Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) e Formaldeído (CH₂O). Embora o Radão (Rn) seja um parâmetro previsto na legislação, a cidade de Bragança não se encontra entre as zonas obrigatórias para a sua monitorização. A Tabela 19 apresenta os limites de proteção e a margem de tolerância para os poluentes físico-químicos definidos pela Portaria n.º 138-G/2021.

Tabela 19 Limiar de proteção e margem de tolerância para poluentes físico-químicos

Poluentes	Unidades	Limiar de proteção	Margem de tolerância [%]
Partículas em suspensão (fração PM ₁₀)	[µg/m ³]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM _{2,5})	[µg/m ³]	25	100
COV	[µg/m ³]	600	100
CO	[mg/m ³]	10	-
	[ppmv]	9	-
CH ₂ O	[µg/m ³]	100	-
	[ppmv]	0,08	-
CO ₂	[mg/m ³]	2250	30
	[ppmv]	1250	30

Fonte: Portaria n° 138-G/2021

De acordo com esta norma, os limiares de proteção devem ser comparados com médias móveis de oito horas, devendo estas serem recolhidas durante períodos de maior ocupação dos espaços monitorizados. Além disso, a portaria estabelece que os valores de concentração devem ser expressos em µg/m³ ou mg/m³, sob condições de referência: 20 °C de temperatura e 1 atm (101,325 kPa de pressão). Outro ponto relevante refere que a margem de tolerância se aplica apenas a edifícios novos ou existentes que não possuam sistemas mecânicos de ventilação. Deste modo, como a biblioteca está integrada no sistema de ventilação mecânica do edifício, os valores médios das concentrações monitorizadas devem estar iguais ou inferiores aos limiares de proteção estabelecidos pela portaria, a fim de garantir a conformidade legal.

3.7.2 Poluentes microbiológicos

A seleção dos parâmetros microbiológicos atendeu as exigências legais da Portaria n° 138-G/2021, que determina a quantificação de fungos e bactérias como critérios de avaliação para poluentes microbiológicos. A Tabela 20 apresenta os valores de referência para as concentrações admissíveis de fungos e bactérias, conforme definidos na referida portaria.

Tabela 20 Condições de referência para poluentes microbiológicos

Poluentes	Matriz	Unidade	Condições de referência
Bactérias	Ar	[UFC/m ³]	Concentração de bactérias totais no interior inferior à concentração no exterior, acrescida de 350 UFC/m ³
Fungos	Ar	[UFC/m ³]	Concentração de fungos no interior inferior à detetada no exterior

Fonte: Portaria n° 138-G/2021

Destaca-se, no caso dos fungos, que além de a concentração total observada no interior dever ser inferior à verificada no exterior, a portaria também estabelece limites com base na perigosidade das diferentes espécies, conforme detalhado na Tabela 21.

Tabela 21 Condições específicas para a verificação da conformidade de fungos com base na perigosidade das diferentes espécies

	Espécies	Condições específicas de conformidade
Espécies comuns (excluindo as produtoras de toxinas).	<i>Cladosporium</i> spp., <i>Penicillium</i> spp., <i>Aspergillus</i> spp., <i>Alternaria</i> spp., <i>Eurotium</i> spp., <i>Paecilomyces</i> spp., <i>Wallemia</i> spp	Mistura de espécies: concentração inferior ou igual a 500 UFC/m ³
Espécies pouco comuns	<i>Acremonium</i> spp., <i>Chrysonilia</i> spp., <i>Tricothecium</i> spp., <i>Curvularia</i> spp., <i>Nigrospora</i> spp.	Cada espécie: concentração inferior a 50 UFC/m ³ Mistura de espécies: concentração inferior ou igual a 150 UFC/ m ³
Espécies patogênicas	<i>Cryptococcus neoformans</i> , <i>Histoplasma capsulatum</i> , <i>Blastomyces dermatitidis</i> , <i>Coccidioides immitis</i>	Ausência de toda e qualquer espécie.
Espécies toxigenicas	<i>Stachybotrys chartarum</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>Fusarium culmorum</i> , <i>Trichoderma viride</i>	Cada espécie: concentração inferior a 12 UFC/m ³ (várias colônias por cada placa).

Fonte: Portaria nº 138-G/2021

4. Resultados e discussão

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos ao longo da pesquisa, com o intuito de compreender as condições ambientais da biblioteca estudada e suas implicações para o conforto dos usuários e a conservação do acervo. Inicialmente, os dados relativos à ventilação são discutidos, com base nos cálculos da taxa de renovação do ar e a taxa de ventilação do ambiente. Os parâmetros de conforto térmico são analisados a seguir, com ênfase nas medições de temperatura e umidade relativa do ar. Os resultados são comparados com os limites recomendados pela literatura e pelas legislações pertinentes, visando avaliar o grau de adequação das condições ambientais ao conforto dos ocupantes. Posteriormente, são apresentados os resultados relativos aos poluentes gasosos detectados no ambiente. A análise envolve a identificação de suas possíveis fontes, a variação de suas concentrações ao longo do tempo e a comparação com os limites estabelecidos pela legislação vigente e por referências bibliográficas específicas. Em seguida, são abordados os dados referentes ao

material particulado, com foco nas frações PM_{2,5} e PM₁₀. A presença e a concentração dessas partículas são discutidas à luz de seus impactos sobre a saúde respiratória e sobre o acervo documental, bem como em relação à conformidade com os valores de referência legais e técnicos. A análise segue com a avaliação dos poluentes microbiológicos presentes no ambiente, considerando-se tanto a concentração quanto a diversidade de microrganismos identificados. Por fim, é apresentada a análise das correlações entre os diferentes parâmetros monitorados, buscando-se identificar padrões de comportamento e inter-relações entre variáveis físicas, químicas e biológicas.

4.1 Avaliação da ventilação

Na Tabela 22 são apresentadas as taxas médias de renovação do ar calculadas para cada um dos compartimentos estudados. Nota-se que, quando a taxa de ventilação é calculada com base na ocupação média monitorizada, os valores obtidos encontram-se de acordo com o valor mínimo estabelecido pela norma EN 16798-1:2019 (10 L/s por ocupante). Contudo, ao avaliar a taxa de ventilação considerando a capacidade máxima de cada compartimento, observa-se que apenas o Gabinete I se encontra em conformidade com o valor recomendado. Esta questão evidencia um possível problema de ventilação nos compartimentos, à medida que a ocupação se aproxima da capacidade máxima dos espaços.

Tabela 22 Taxa média de ventilação observada nos pontos de amostragem

Compartimento da biblioteca	Pontos de amostragem	Capacidade máxima	Ocupação média monitorizada	Caudal de ventilação (L/s)	Taxa de ventilação (L/s por pessoa)	
					Capacidade máxima	Ocupação média monitorizada
Sala de leitura I	C1	54	6,90	173,93	3,22	25,21
	C2		6,95	294,96	5,46	42,40
	C3		7,90	315,54	5,84	39,94
Sala de leitura II	G7	16	5,42	111,97	7,00	20,66
Gabinete I	G5	6	3	69,19	11,53	23,06

No que diz respeito à taxa de renovação do ar, a Tabela 23 apresenta os resultados observados para cada compartimento. No período de encerramento da UTA, a taxa de renovação do ar reduz-se significativamente, tornando-se compatível com a ventilação passiva da edificação (infiltração). Durante este período, a menor taxa de renovação foi registada no ponto A8. Embora A8 e A4 se encontrem no depósito de livros, o ponto A4 situa-se próximo de uma porta (não vedada) que liga a sala ao exterior, o que favorece a ventilação naquele local. Outro aspeto relevante nesta situação é que alterações nas temperaturas e pressões entre os ambientes interiores e o exterior podem provocar variações no processo de infiltração (Etheridge & Sandberg, 1996; US EPA, 2025).

Tabela 23 Taxa média de renovação do ar observadas nos pontos de amostragem

Compartimento da biblioteca	Pontos de amostragem	Taxa de renovação do ar (h^{-1})	
		Durante o funcionamento da UTA	Após o encerramento da UTA
Deposito de livros	A4	-	0,039
	A8	-	0,007
Sala de leitura I	C1	0,55	0,036
	C2	0,93	0,020
	C3	0,99	0,029
Sala de leitura II	G7	3,12	0,036
Gabinete I	G5	3,92	0,022

Durante o período de funcionamento da UTA, observou-se que os pontos localizados na Sala de Leitura I (entre $0,55 h^{-1}$ e $0,99 h^{-1}$) apresentaram taxas de renovação do ar mais baixas do que as observadas na Sala de Leitura II ($3,12 h^{-1}$) e no Gabinete I ($3,92 h^{-1}$). Um dos fatores que podem ter contribuído para este fenômeno é a diferença de temperatura entre esses compartimentos e os demais, devido à presença do ar condicionado tipo split (Gabinete I). A diferença de temperaturas entre ambientes pode ocasionar alterações no fluxo de ar, provocando mudanças nas concentrações de poluentes e na ventilação.

Os valores obtidos na Sala de Leitura I mantiveram-se dentro dos intervalos descritos por Thicket et al. (2007), que reportaram valores entre $0,08 h^{-1}$ e $0,93 h^{-1}$. A Sala de Leitura II e o Gabinete I apresentaram valores acima da faixa descrita pelo autor. Outro ponto relevante é a tendência observada de que os espaços destinados ao armazenamento das coleções apresentem taxas de renovação do ar mais baixas do que os espaços habitualmente ocupados, conforme também descrito por ASHRAE (2019).

4.2 Parâmetros de conforto térmico

A temperatura e a umidade relativa do ar são parâmetros chave para a análise das condições de conforto térmico. Na Tabela 24 são apresentados os valores médios, desvios padrão, mínimos e máximos da temperatura e umidade relativa do ar para os pontos de amostragem durante as estações do ano avaliadas.

Tabela 24 Temperatura e HR do ar nos diferentes pontos de amostragem

Ponto de amostragem*	Estação do ano	Méd ± Dp	Temperatura (°C)			Humidade relativa (%)		
			Mín - Max	±		Mín - Max	±	
A4	Outono	Méd ± Dp	17,80	±	0,57	37,30	±	1,29
		Mín - Max	16,80	-	19,60	34,40	-	39,60
	Inverno	Méd ± Dp	19,60	±	0,05	39,00	±	0,41
		Mín - Max	19,50	-	19,60	38,60	-	39,40
	Primavera	Méd ± Dp	20,10	±	0,34	36,10	±	0,61
		Mín - Max	19,60	-	20,80	35,00	-	36,90
A8	Outono	Méd ± Dp	19,20	±	0,14	38,10	±	0,19
		Mín - Max	19,10	-	19,60	37,80	-	38,50
	Inverno	Méd ± Dp	19,70	±	0,14	38,50	±	0,51
		Mín - Max	19,60	-	19,90	37,90	-	38,80
	Primavera	Méd ± Dp	20,00	±	0,25	35,00	±	0,62
		Mín - Max	19,60	-	21,10	33,40	-	36,00
C1	Outono	Méd ± Dp	20,40	±	1,27	34,90	±	3,73
		Mín - Max	19,20	-	23,20	26,80	-	37,30
	Inverno	Méd ± Dp	22,50	±	0,61	32,10	±	0,33
		Mín - Max	21,80	-	23,10	31,80	-	32,50
	Primavera	Méd ± Dp	20,00	±	0,25	35,00	±	0,62
		Mín - Max	20,30	-	25,00	25,10	-	34,80
C2	Outono	Méd ± Dp	21,60	±	1,73	29,30	±	3,45
		Mín - Max	17,20	-	24,20	25,90	-	34,40
	Inverno	Méd ± Dp	21,50	±	1,55	35,40	±	2,33
		Mín - Max	20,10	-	24,90	29,60	-	36,90
	Primavera	Méd ± Dp	23,20	±	1,90	29,80	±	3,72
		Mín - Max	20,90	-	26,20	23,50	-	33,40
C3	Outono	Méd ± Dp	23,50	±	0,34	26,30	±	0,65
		Mín - Max	23,00	-	23,80	25,70	-	27,10
	Inverno	Méd ± Dp	24,10	±	0,39	31,10	±	0,55
		Mín - Max	23,70	-	24,50	30,60	-	31,70
	Primavera	Méd ± Dp	23,10	±	1,98	30,50	±	3,85
		Mín - Max	20,80	-	26,20	24,40	-	34,00
G5	Outono	Méd ± Dp	24,30	±	0,78	26,60	±	2,26
		Mín - Max	23,00	-	24,90	25,00	-	30,60
	Inverno	Méd ± Dp	23,10	±	2,11	33,00	±	3,29
		Mín - Max	20,80	-	27,40	25,60	-	36,00
	Primavera	Méd ± Dp	25,30	±	1,16	32,90	±	2,17
		Mín - Max	23,40	-	26,70	30,40	-	36,00
G7	Outono	Méd ± Dp	23,90	±	0,54	27,40	±	1,31
		Mín - Max	23,00	-	24,30	25,70	-	28,90
	Inverno	Méd ± Dp	24,20	±	0,51	31,60	±	2,36
		Mín - Max	23,60	-	24,50	30,10	-	34,40
	Primavera	Méd ± Dp	23,80	±	1,55	31,60	±	2,58
		Mín - Max	20,90	-	26,30	26,90	-	36,40

*A4 e A8- Depósito de livros; C1, C2 e C3- Sala de leitura I; G7- Sala de leitura II e G5- Gabinete I.

4.2.1 Temperatura do ar

Na Figura 10 observa-se a evolução da temperatura ao longo do tempo em diferentes espaços, com destaque para os momentos de ligação e fecho do sistema de climatização. Embora A8 não esteja diretamente abrangido pela UTA, são detetadas variações térmicas subtis nesse ponto, com tendência de aumento da temperatura após o início do funcionamento da climatização, o que sugere dispersão de calor de zonas climatizadas (como C2 e G7) para áreas não climatizadas (como A4 e A8).

O segundo aspeto relevante diz respeito à presença de ar condicionado do tipo split e aquecedores portáteis no Gabinete I (ponto G5). Estes equipamentos são controlados manualmente pelas funcionárias que ali trabalham. Apesar de estarem localizados apenas no gabinete, a ausência de uma divisória completa entre o Gabinete I e a Sala de Leitura II (G7) permite a transferência de calor entre os dois espaços, influenciando as condições térmicas de ambos os ambientes.

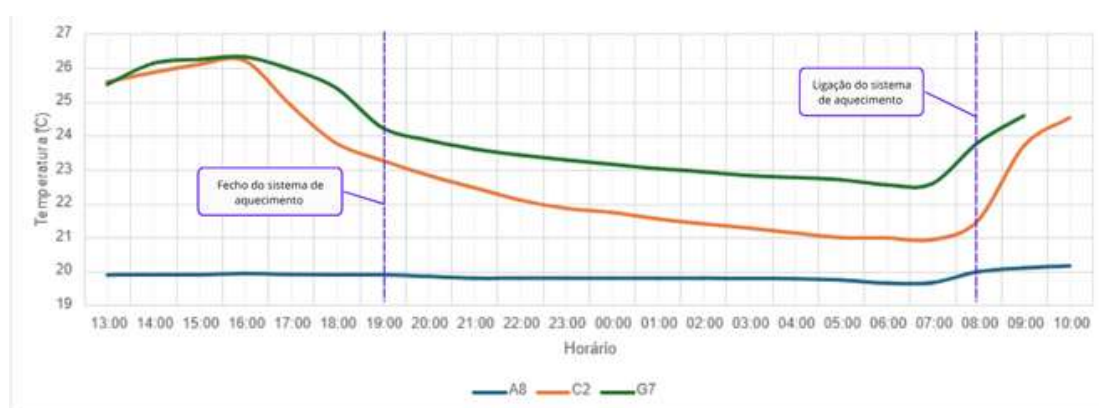


Figura 10 Variação temporal da temperatura com indicação dos momentos de ligação e fecho do sistema de climatização (campanha de primavera)

As oscilações de temperatura observadas na Figura 10 são pontos de atenção para a preservação do acervo. De acordo com Brown et al. (2002) variações bruscas de temperatura em curto períodos de tempo podem causar danos irreversíveis no acervo, ao promover movimentos de expansão e contração dos materiais, o que está associado ao processo de enfraquecimento dos materiais.

Em relação à temperatura (Figura 11), os pontos A4 e A8, localizados em zonas não climatizadas, apresentaram os valores médios mais baixas em todas as estações do ano, entre 17,8 °C e 20,1 °C. Em contrapartida, os pontos G5 e G7, com climatização suplementar, registaram as temperaturas médias mais elevadas, frequentemente superiores a 22 °C. Já os espaços C1, C2 e C3, atendidos diretamente pela UTA, exibiram valores médios intermediários, geralmente entre 20 °C e 24 °C, com menor variabilidade ao longo do tempo.

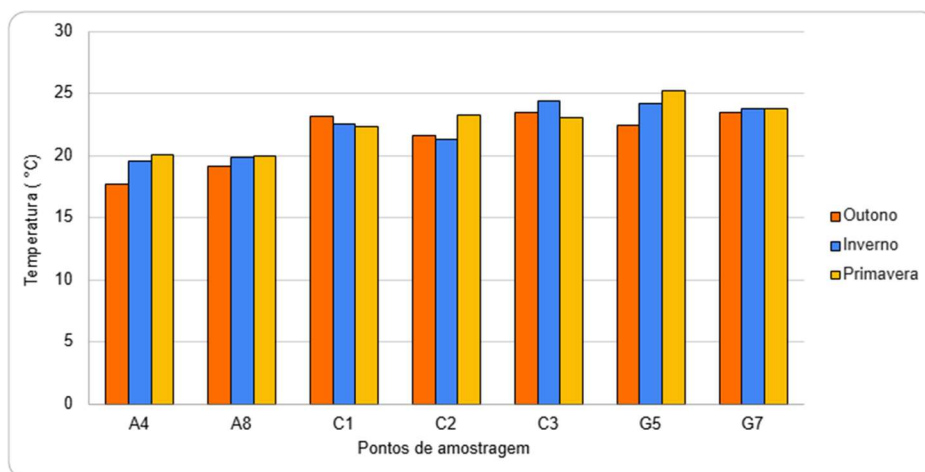


Figura 11 Valores médios sazonais de temperatura por ponto de amostragem

4.2.1.1 Variabilidade sazonal e espacial da temperatura do ar

O teste de Kruskal-Wallis ($X^2 = 292$; $gl = 6$; $p < 0,001$) demonstrou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre os pontos de amostragem. Os resultados do pós teste DCSF (Anexo C) demonstraram que os pontos A4 e A8 apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) em comparação com os demais pontos de amostragem, o que reafirma os impactos da ausência de climatização nas temperaturas observadas no depósito de livros. Outro aspeto observado foi o comportamento dos pontos G5 e G7, que também divergiram dos demais pontos, com exceção de C3. Este fenómeno pode estar relacionado com a utilização do ar-condicionado em G5 e o consequente aquecimento de G7. A proximidade das distribuições destes pontos com C3 pode resultar da influência da radiação solar em C3, o que promove um maior aquecimento em comparação com outros pontos da Sala de Leitura I. Tal situação também pode ser notada pela divergência existente entre C3 e C1.

A avaliação dos efeitos da sazonalidade também foi realizada. O teste de Kruskal-Wallis ($X^2 = 101,9$; $gl = 2$; $p < 0,001$) indicou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as estações do ano. O pós-teste de DCSF (Anexo C) demonstrou que o outono apresentou divergências das demais estações estudadas. De forma geral, notou-se que as temperaturas registadas no outono foram as mais baixas, esse fenómeno também foi observado no exterior da edificação (Tabela 17). Estas variações de comportamento podem ser atribuídas a diversos fenómenos, como a influência das temperaturas do exterior e o nível de ocupação dos espaços.

4.2.2 Humidade do ar

A humidade relativa do ar é um parâmetro indissociável da temperatura do ar (Legg, 2017). Diante disso, apesar do sistema de climatização da biblioteca não apresentar controlo ativo da humidade relativa do ar, seu funcionamento pode afetar o comportamento da humidade relativa no interior destes espaços. A Figura 12 apresenta a influência do sistema de climatização da biblioteca sobre a humidade relativa em diferentes pontos de amostragem.

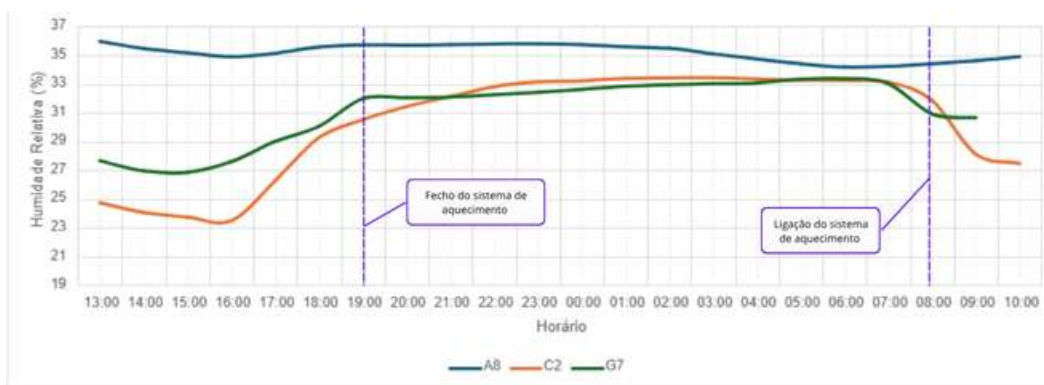


Figura 12 Variação temporal da umidade relativa com indicação dos momentos de ligação e fecho do sistema de climatização (campanha de primavera)

Nota-se que a partir do acionamento do sistema de climatização, nos pontos C2 e G7, os valores registados de HR do ar diminuem. Em contrapartida, com o fecho do sistema, a HR apresenta um pequeno aumento e segue para a estabilização. Tendo em vista que o sistema de climatização da biblioteca não possui controlo de humidade relativa, oscilações deste parâmetro podem estar relacionadas a variações de temperatura causadas pela operação do sistema. De acordo com Henderson (2013), à medida que a temperatura do ar aumenta, a tendência é que a HR diminua, devido ao aumento da capacidade máxima de retenção de vapor de água, e vice-versa.

Outro ponto importante refere-se à influência da ocupação dos espaços sobre a HR. Os horários de pico observados durante as medições ocorreram entre as 16h e às 19h, sendo observados nestes horários o aumento expressivo da humidade relativa. De acordo com APA (2010) e ABNT (2023), a respiração e transpiração são fontes importantes de libertação de vapor de água em ambientes interiores. Assim, horários de pico em espaços sem sistemas de ventilação natural podem provocar aumentos nos valores de humidade relativa medidos. De acordo com Adcock et al.(1999) e Brown et al. (2002) as oscilações de HR, bem como de temperatura, ao longo do dia são pontos de atenção para a preservação do acervo, uma vez que alterações bruscas destes parâmetros aumentam o risco de degradação de materiais, especialmente papéis.

Relativamente aos valores médios de humidade relativa por ponto de amostragem e por estação do ano (Figura 13), os valores médios mais altos foram observados em A4 (36,10% - 39%) e A8 (35% - 38,50%), os quais não fazem parte dos ambientes climatizados da biblioteca. Isso pode ser resultado da influência de fatores externos, visto que o depósito da biblioteca possui uma porta que liga ao exterior da edificação, ou às características térmicas destes espaços, uma vez que são espaços mais frios do que os demais ambientes.

Apesar do observado em A4 e A8, onde é possível traçar uma correlação entre as temperaturas e HR. Nos pontos da Sala de Leitura I (especialmente em C1 e C2) a ocupação parece ter um papel relevante, uma vez que os valores mais baixos de HR não ocorreram juntamente com as temperaturas médias mais altas nestes pontos. Corroborando para essa observação, o ponto C3, que apresentou os valores médios mais baixos de HR (26,30% - 31,10%), encontram-se em um ponto mais

isolado da Sala de Leitura I, sendo rodeado por estantes. Já os pontos C1 e C2, que apresentaram valores intermediários (29,30% - 35,40%), estão próximas as mesas de estudos da biblioteca.

Os pontos G5 e G7, apresentaram médias intermediarias (26,60% - 33%), apesar de haver tendência à redução da HR associada à utilização de ar condicionados do tipo split, pelo aumento da temperatura. Tal resultado sugere uma possível influência da ocupação contínua de pessoas sobre os níveis de humidade nestes espaços.

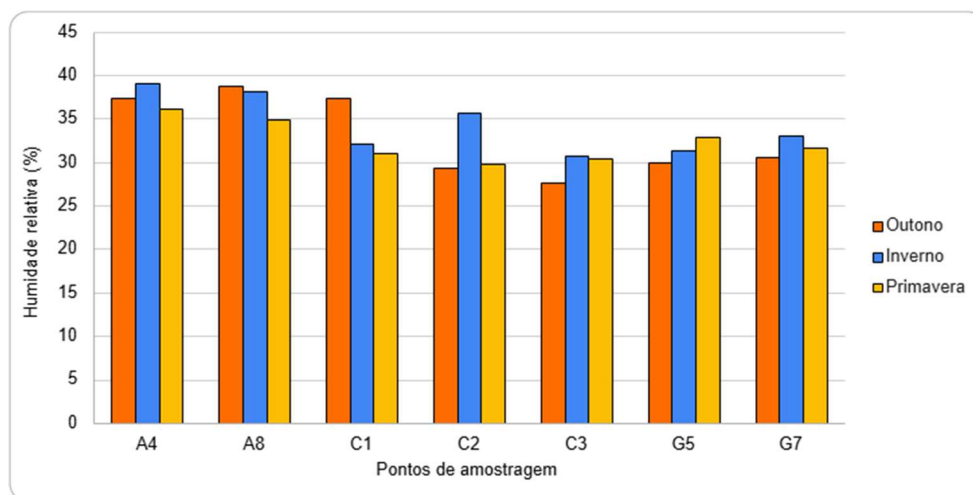


Figura 13 Valores médios sazonais de humidade relativa por ponto de amostragem

Diante deste panorama, a principal preocupação relacionada à HR são baixos valores registados em todos os espaços monitorizados. Durante o período de estudo, os níveis não ultrapassaram os 40% em momento algum. Tal situação deve ser encarada como um risco tanto ao acervo quanto à saúde dos ocupantes. Do ponto de vista da saúde humana, Guarnieri et al. (2023) apontam que valores de humidade relativa entre 30% e 40% podem provocar desconforto respiratório, além de aumentar a dispersão viral em ambientes fechados. Em alguns pontos, como C1 (26,80% no outono e 25,10% na primavera) e C2 (25,90% no outono, 29,80% no inverno e 23,50% na primavera), foram observados valores inferiores a 30% em determinadas estações do ano. De acordo com o mesmo autor, essa condição está associada à irritação da mucosa ocular, nasal e da garganta, ao ressecamento da pele e das vias respiratórias, bem como ao aumento do risco de dispersão viral e presença de bactérias oportunistas provenientes de sistemas de climatização.

No que diz respeito à conservação do acervo, Adcock et al. (1999) relatam que humidades relativas inferiores a 40% estão associadas ao aumento da suscetibilidade ao encolhimento, enrijecimento e formação de fissuras nos materiais, tornando-os mais frágeis e propensos à degradação.

4.2.2.1 Avaliação da variabilidade sazonal e espacial da humidade relativa do ar

Com relação as variações espaciais da humidade relativa, os resultados do teste de Kruskal-Wallis ($X^2 = 203$; $gl = 6$; $p < 0,001$) indicam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre os pontos de amostragem. O pós teste de DCSF (Anexo C) mostrou uma maior homogeneidade entre os pontos localizados na área de climatização da biblioteca, principalmente em G5, G7, C2 e C3, os quais não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre si. Por outro lado, os pontos A4 e A8, localizados no depósito de livros, apresentaram valores significativamente diferentes de todos os demais locais ($p < 0,001$), sugerindo o impacto da ausência do sistema de climatização nestes espaços.

Já no que diz respeito ao efeito da sazonalidade sobre a HR, o teste de Kruskal-Wallis ($X^2 = 55,5$; $gl = 2$; $p < 0,001$) revelou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as estações do ano. Complementando essa análise, o pós teste de DCSF (Anexo C) revelou diferenças significativas entre todas as estações do ano estudadas, podendo ser um reflexo das variações na ocupação dos espaços, oscilações da temperatura do ar e, principalmente, esse fenómeno pode estar relacionado a falta de controlo ativo de humidade no sistema de climatização.

4.2.3 Avaliação do conforto térmico

Para a avaliação da sensação térmica dos ocupantes, utilizou-se ao diagrama de conforto térmico disponibilizado pelo INMET. Embora seja uma análise simplificada, o diagrama permite relacionar os valores de temperatura do ar e humidade relativa, oferecendo uma aproximação da perceção térmica dos usuários.

A Figura 14 apresenta a aplicação do diagrama de conforto térmico para cada ponto de amostragem, utilizando os valores médios observados durante cada campanha de monitorização. Verifica-se uma tendência geral para que os pontos de amostragem sejam classificados como "muito secos", com destaque para o ponto C3, que, independentemente da estação do ano, permaneceu nessa categoria. Este resultado reforça a problemática dos baixos níveis de humidade relativa registados na biblioteca.

Outra tendência observada foi a indicação de necessidade de exposição ao sol nos pontos A4 e A8 para que o conforto térmico fosse alcançado — situação explicada, sobretudo, pelas baixas temperaturas verificadas nesses locais. O conforto térmico foi registado no outono no ponto C1 e durante o inverno nos pontos C1, C2 e G5. Na primavera, apenas o ponto G5 apresentou condições médias consideradas confortáveis.

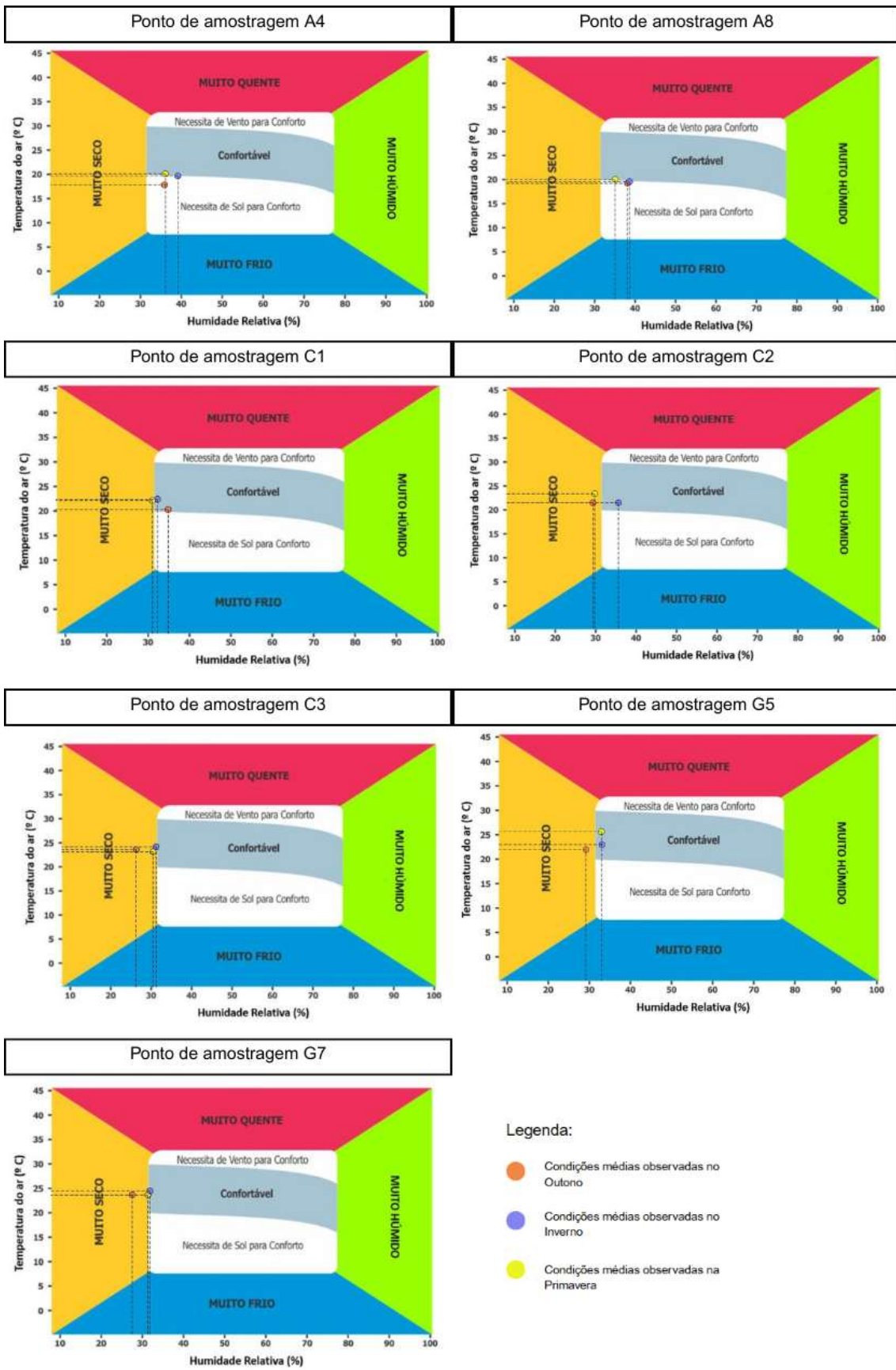


Figura 14 Resultado da avaliação de conforto térmico a partir do Diagrama de conforto térmico disponibilizado pelo INMET (2019)

Em relação à conformidade legal do conforto térmico, em Portugal existem dois diplomas legais que tratam sobre a temática em edifícios como bibliotecas: o Decreto-Lei n.º 243/1986 e o Decreto-Lei n.º 101-D/2020. O Decreto-Lei n.º 243/1986 estabelece a regulamentação geral de higiene e segurança no trabalho em estabelecimentos comerciais, de serviços e escritórios. Embora não defina limites legais fixos para temperatura e humidade relativa nos locais de trabalho, apresenta valores de referência considerados adequados para a garantia do conforto térmico e saúde. Para temperatura, os valores devem oscilar entre 18 °C e 22 °C, podendo atingir os 25 °C em situações específicas. Já para a HR, os valores devem variar entre 50% e 70%. Por sua vez, o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 regula o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios e estabelece critérios para a melhoria do desempenho energético dos edifícios. Assim como o Decreto-Lei n.º 243/1986, este diploma exige a garantia do conforto térmico e da qualidade do ar interior, ainda que não defina valores específicos para a temperatura do ar ou para a humidade relativa.

4.3 Poluentes gasosos

A Tabela 25 apresenta os valores médios, desvios padrão, mínimos e máximos dos poluentes gasosos estudados, nomeadamente monóxido de carbono, compostos orgânicos totais, dióxido de carbono e formaldeído, durante as estações do ano estudadas.

Tabela 25 Poluentes gasosos do ar nos diferentes pontos de amostragem durante as estações do ano

Ponto de amostragem	Estação do ano		CO (ppm)			COV (ppb)			CO ₂ (ppm)			CH ₂ O (ppb)		
			Méd ± Dp	±		Méd ± Dp	±		Méd ± Dp	±		Méd ± Dp	±	
A4	Outono	Méd ± Dp	0,38	±	0,09	73,74	±	55,06	329,86	±	21,11	0,19	±	0,50
		Mín - Max	0,20	-	0,58	52,03	-	448,08	303,68	-	419,30	0,00	-	2,08
	Inverno	Méd ± Dp	0,20	±	0,00	100,53	±	1,67	429,29	±	1,99	0,00	±	0,00
		Mín - Max	0,20	-	0,20	98,64	-	101,83	427,02	-	430,73	0,00	-	0,00
	Primavera	Méd ± Dp	0,21	±	0,03	61,40	±	3,62	425,00	±	23,34	0,19	±	0,32
		Mín - Max	0,20	-	0,30	57,63	-	72,12	399,03	-	485,93	0,00	-	0,98
A8	Outono	Méd ± Dp	0,37	±	0,10	109,60	±	80,06	357,43	±	66,20	1,50	±	1,16
		Mín - Max	0,20	-	0,50	65,62	-	425,45	294,21	-	497,20	0,00	-	5,12
	Inverno	Méd ± Dp	0,21	±	0,01	98,14	±	2,43	404,43	±	19,21	0,43	±	0,26
		Mín - Max	0,20	-	0,22	95,36	-	99,89	383,78	-	421,78	0,15	-	0,67
	Primavera	Méd ± Dp	0,22	±	0,05	71,83	±	14,04	376,18	±	31,12	0,50	±	0,54
		Mín - Max	0,13	-	0,40	58,95	-	124,37	344,07	-	462,73	0,00	-	2,35
C1	Outono	Méd ± Dp	0,61	±	0,14	36,34	±	13,13	544,72	±	166,28	3,11	±	1,87
		Mín - Max	0,43	-	1,10	20,38	-	84,33	365,08	-	899,33	0,00	-	5,00
	Inverno	Méd ± Dp	0,53	±	0,05	97,96	±	11,71	373,61	±	34,61	0,58	±	1,00
		Mín - Max	0,50	-	0,58	88,21	-	110,95	340,47	-	409,53	0,00	-	1,74
	Primavera	Méd ± Dp	0,22	±	0,05	71,83	±	14,04	376,18	±	31,12	0,50	±	0,54
		Mín - Max	0,20	-	0,30	39,30	-	95,95	384,32	-	642,18	0,00	-	5,00

Tabela 25 (continuação)

C2	Outono	Méd ± Dp	0,38 ± 0,08	98,59 ± 70,39	507,09 ± 101,14	0,66 ± 1,07
		Mín - Max	0,21 - 0,50	27,78 - 275,63	360,82 - 679,63	0,00 - 3,00
	Inverno	Méd ± Dp	0,41 ± 0,07	95,44 ± 5,43	493,44 ± 82,38	2,84 ± 1,57
		Mín - Max	0,23 - 0,50	82,91 - 105,47	364,78 - 657,83	0,00 - 4,00
	Primavera	Méd ± Dp	0,27 ± 0,07	153,83 ± 81,27	449,94 ± 39,29	3,16 ± 2,44
		Mín - Max	0,18 - 0,46	41,11 - 320,92	397,21 - 530,60	0,00 - 6,00
C3	Outono	Méd ± Dp	0,38 ± 0,16	30,44 ± 10,04	439,13 ± 22,42	0,00 ± 0,00
		Mín - Max	0,11 - 0,50	24,46 - 48,18	407,41 - 462,00	0,00 - 0,00
	Inverno	Méd ± Dp	0,50 ± 0,01	87,05 ± 0,92	456,15 ± 16,05	0,00 ± 0,00
		Mín - Max	0,49 - 0,50	86,30 - 88,08	442,06 - 473,62	0,00 - 0,00
	Primavera	Méd ± Dp	0,25 ± 0,05	83,35 ± 23,66	476,09 ± 64,63	2,42 ± 2,05
		Mín - Max	0,19 - 0,30	44,38 - 122,62	384,20 - 627,15	0,00 - 5,00
G5	Outono	Méd ± Dp	0,22 ± 0,07	90,57 ± 93,81	490,26 ± 101,42	0,60 ± 1,35
		Mín - Max	0,12 - 0,37	49,26 - 322,40	304,11 - 667,63	0,00 - 3,91
	Inverno	Méd ± Dp	0,28 ± 0,10	94,28 ± 17,64	555,29 ± 114,78	3,10 ± 2,39
		Mín - Max	0,12 - 0,54	65,58 - 156,13	391,15 - 756,67	0,00 - 7,10
	Primavera	Méd ± Dp	0,20 ± 0,01	75,47 ± 9,35	603,20 ± 98,38	3,41 ± 3,00
		Mín - Max	0,16 - 0,20	61,25 - 85,45	477,13 - 781,43	0,00 - 7,00
G7	Outono	Méd ± Dp	0,36 ± 0,13	77,28 ± 55,93	563,48 ± 94,67	0,91 ± 9,91
		Mín - Max	0,21 - 0,55	49,40 - 202,60	471,02 - 726,90	0,00 - 27,29
	Inverno	Méd ± Dp	0,26 ± 0,09	92,11 ± 3,86	703,03 ± 145,70	2,99 ± 5,00
		Mín - Max	0,20 - 0,36	89,88 - 96,57	604,00 - 870,33	0,00 - 8,76
	Primavera	Méd ± Dp	0,25 ± 0,05	68,41 ± 7,93	575,50 ± 104,87	3,01 ± 2,17
		Mín - Max	0,15 - 0,30	55,72 - 79,05	456,77 - 792,15	0,00 - 5,67

* A4 e A8 - Depósito de livros; C1, C2 e C3 - Sala de leitura I; G7 - Sala de leitura II e G5- Gabinete I.

4.3.1 Monóxido de Carbono

A monitorização do monóxido de carbono (CO) em ambientes interiores é essencial para a garantia da segurança dos ocupantes (APA, 2010). No presente trabalho, os pontos localizados na Sala de Leitura I foram os que apresentaram os valores médios mais elevados, variando entre 0,22 ppm e 0,61 ppm (Figura 15). Por outro lado, o Gabinete I evidenciou as concentrações médias mais baixas em comparação com os demais pontos (0,20 ppm – 0,28 ppm) e a Sala de Leitura II apresentou valores médios (0,25 ppm a 0,36 ppm). Além disso, os pontos A4 e A8 apresentaram médias semelhantes ao longo das estações do ano (0,20 – 0,38 ppm).

O CO é emitido a partir de processos de combustão incompleta de matéria orgânica. Neste sentido, a biblioteca não apresenta fontes diretas e evidentes desse poluente. As concentrações médias variaram entre 0,2 ppm e 0,61 ppm, estando dentro da faixa expectável para ambientes interiores sem fontes ou sem fontes significativas de emissão quer no interior quer no exterior (Jain et al., 2025; Ferreira & Cardoso, 2013).

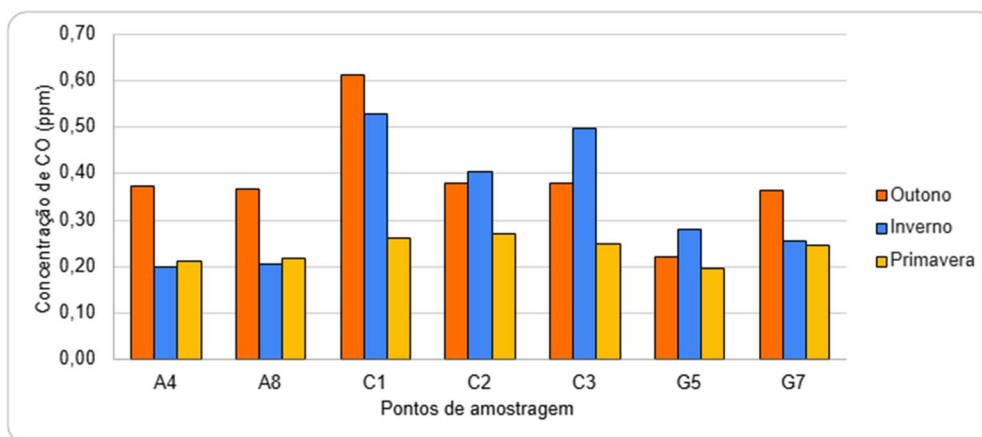


Figura 15 Concentrações médias sazonais de monóxido de carbono por ponto de amostragem

A avaliação da razão interior/exterior (I/E) é útil na identificação das possíveis origens do poluente. A Figura 16 apresenta os valores da razão I/E observados em cada ponto de amostragem ao longo das estações do ano. Verifica-se uma tendência de redução da razão I/E na primavera para todos os pontos de amostragem. Tal como observado por Ferreira e Cardoso (2013), o aumento da razão I/E nos meses mais frios pode estar relacionado com dificuldades na dissipação do CO proveniente de sistemas de aquecimento no interior da edificação, ou com o acúmulo de CO emitido no exterior, agravado por limitações na ventilação. Além disso, os pontos C1, C2 e C3 apresentaram razões I/E mais elevadas do que os demais pontos em todas as estações. Uma explicação plausível para esse fenómeno é a proximidade do hall de entrada da biblioteca ao hall da cafeteria da ESA. Neste contexto, os processos de cocção e preparação de alimentos naquela área podem estar a contribuir para a presença de CO na Sala de Leitura I. A ocorrência mais evidente dessa situação nestes pontos pode estar relacionada com a sua localização próxima à porta principal da biblioteca, única entrada e saída de uso público, que se mantém frequentemente aberta, facilitando a entrada de poluentes.

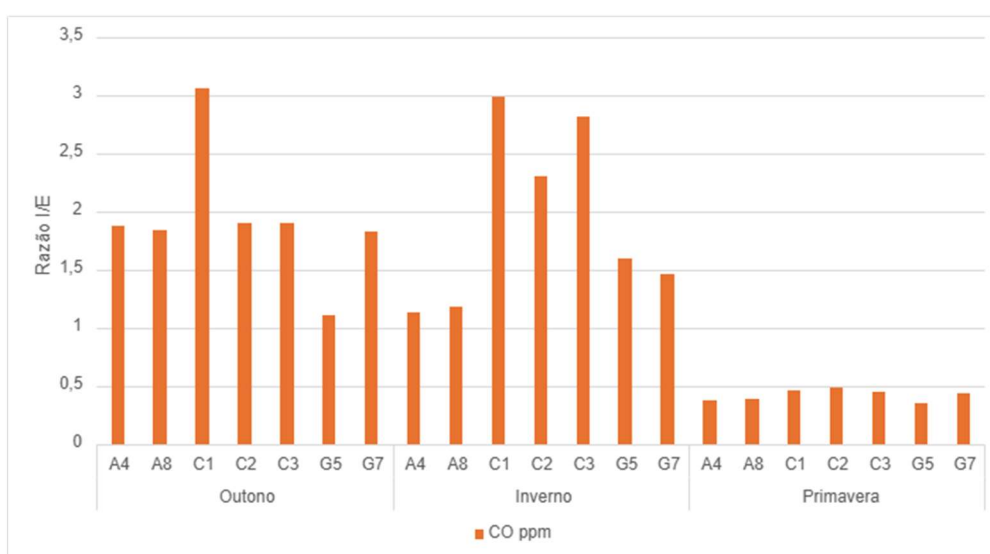


Figura 16 Variações sazonais da razão I/E de monóxido de carbono por ponto de amostragem durante as estações do ano

4.3.1.1 Variabilidade sazonal e espacial de monóxido de carbono

O teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 84,2$; $gl = 6$; $p\text{-valor} = 0,001$) demonstrou diferenças estatisticamente significativas entre os espaços estudados. Diante disso, os resultados das comparações múltiplas (Anexo C) indicaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre os pontos da Sala de Leitura I. O ponto C1 destacou-se por apresentar diferenças relevantes em comparação com quase todos os outros pontos, exceto A4 e C2. Isso demonstra que, mesmo em ambientes com climatização semelhante, podem existir diferenças significativas na distribuição do poluente. Tal comportamento pode estar relacionado à proximidade com fontes internas de emissão ou à influência da disposição dos sistemas de insuflação e extração de ar, bem como à presença de mobiliário que possa interferir na circulação do ar.

Observou-se também que os pontos A4 e A8, situados em zonas não climatizadas, apresentaram comportamentos distintos entre si, possivelmente devido à proximidade com a porta exterior (no caso de A4) ou com zonas mais isoladas do depósito de livros (no caso de A8).

Relativamente aos efeitos da sazonalidade nas concentrações de CO, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 167,6$; $gl = 2$; $p\text{-valor} = 0,001$) revelou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as estações do ano estudadas. O teste de DCSF (Anexo C) demonstrou que todas as estações do ano estudadas apresentaram divergências significativas de comportamento. A ausência de fontes internas específicas de CO e a razão I/E frequentemente maior do que 1, sugerem que o poluente observado pode ser introduzido neste espaço por meio da produção em outros ambientes da ESA. Neste sentido, as atividades e usos feitos nos espaços adjacentes a biblioteca pode promover essas oscilações.

4.3.2 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO₂) é um parâmetro importante para a avaliação da ventilação e para a análise das dinâmicas de ocupação dos ambientes interiores (Marques et al., 2019; Lazović et al., 2016; Godwin & Batterman, 2007). A Figura 17 apresenta o comportamento das concentrações médias sazonais de CO₂ nos diferentes pontos de amostragem ao longo do período estudado.

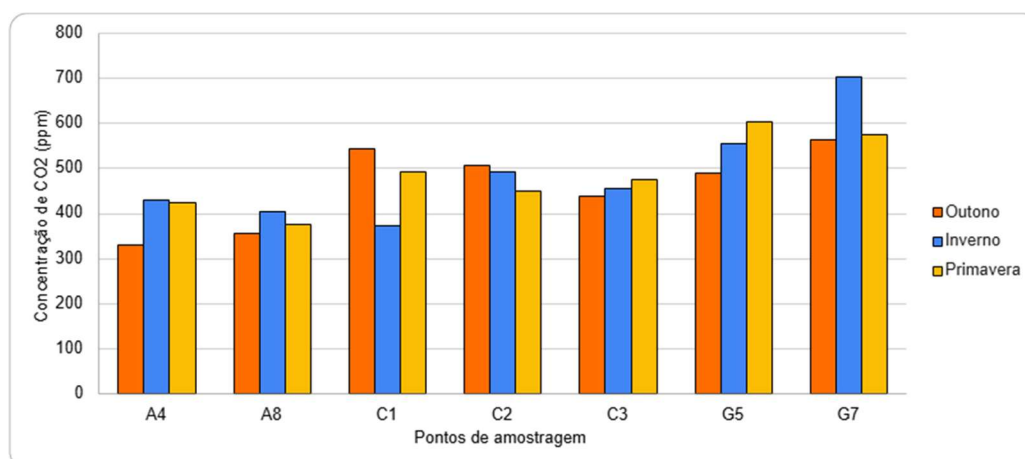


Figura 17 Concentrações médias sazonais de dióxido de carbono por ponto de amostragem

As concentrações mais elevadas de CO₂ foram observadas nos pontos G5 e G7, localizados nos menores compartimentos avaliados (490,26 ppm – 703,03 ppm). Em G5, a ocupação é contínua ao longo do dia, uma vez que se trata de um espaço de trabalho. Este ambiente é ocupado entre as 9h00 e as 18h30, com intervalo de almoço entre 12h30 e 14h00. Verificou-se ainda um aumento da concentração de CO₂ ao longo das estações, o qual está associado à elevação da densidade de ocupação. No início do outono, o Gabinete I era ocupado por duas funcionárias, enquanto na primavera foram observadas até seis pessoas a utilizar o espaço.

As variações de concentração observadas em G7, C1, C2 e C3 podem estar diretamente associadas às flutuações na presença de estudantes. Nesses espaços, a variação do fluxo diário de ocupantes e a ocorrência de épocas de exames ou entrega de trabalhos explicam as oscilações verificadas. A menor ocupação foi registada no outono, enquanto nos períodos de inverno e primavera a ocupação manteve-se relativamente constante.

Ademais, nos ambientes ocupados pelos estudantes as variações do posicionamento dos ocupantes no interior do espaço, podem ocasionar variações nas concentrações monitorizadas, especialmente em C1, C2 e G7. Um indício deste fenómeno é a presença de picos do poluente em estações do ano em que não se observaram as maiores ocupações dos espaços.

Nos pontos A4 e A8, as variações de CO₂ não se relacionam diretamente com a ocupação, uma vez que não se trata de espaços normalmente utilizados de forma permanente. Neste caso, os valores observados poderão estar associados à infiltração de ar proveniente de outras áreas da biblioteca, especialmente da Sala de Leitura I. As concentrações médias nestes pontos foram as mais baixas registadas variando entre 329,86 ppm e 429,29 ppm.

A Figura 18 apresenta o comportamento temporal do CO₂ ao longo do dia, evidenciando uma redução natural da concentração após o encerramento da biblioteca. Também se verifica um aumento significativo entre as 16h00 e as 19h00, período correspondente ao horário de pico de ocupação. Um dado relevante é que a redução da concentração em G7 ocorre mais rapidamente do que em C2, o que pode estar relacionado com as diferenças no volume das salas. Além disso, o Gabinete I é ocupado até às 18h30, o que contribui para a queda de CO₂ começar antes em G7, visto que os ambientes são interligados.

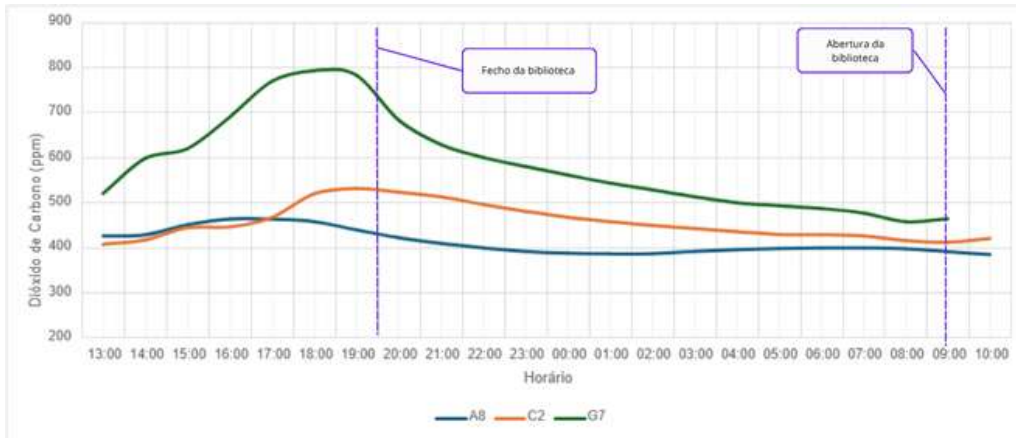


Figura 18 Variação temporal do dióxido de carbono com indicação dos momentos de abertura e encerramento da biblioteca (campanha de primavera)

Quanto à origem do CO₂ no interior do edifício, observou-se que as menores razões I/E ocorreram no outono, coincidindo com a baixa ocupação geral do espaço, inclusive em ambientes pouco frequentados, como o depósito de livros. Durante esta estação, os pontos A4 e A8 foram os únicos com razão I/E inferior a 1, indicando que a poluição presente nesses locais provém essencialmente do exterior. Já nas demais estações, mesmo com padrões de ocupação semelhantes, os valores de I/E superaram 1, o que sugere a presença de fontes internas de emissão.

Tal como se observa na Figura 19, os pontos G5 e G7 apresentaram as maiores razões internas de CO₂, especialmente durante o inverno e a primavera, em consonância com a alta densidade de ocupação desses espaços. Além disso, o aumento de ocupação nos pontos C1, C2 e C3 também se refletiu nas concentrações de CO₂.

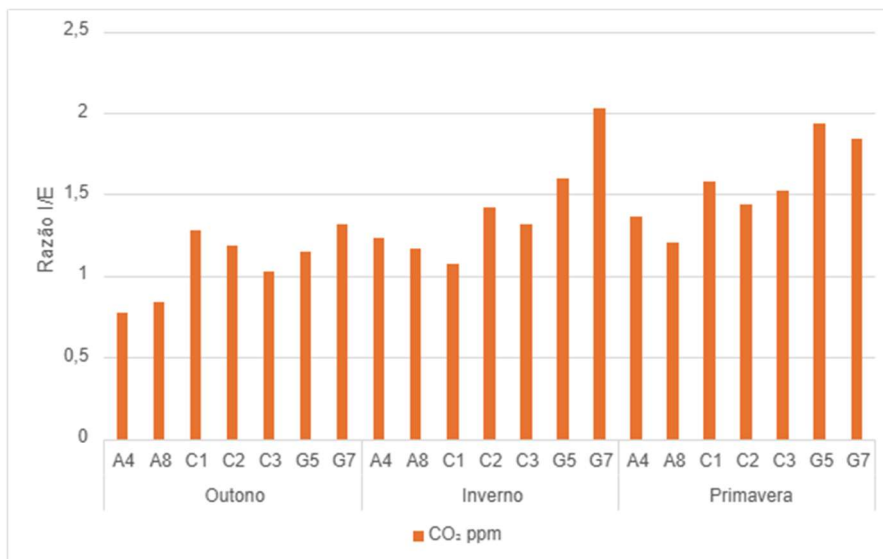


Figura 19 Variações sazonais da razão I/E de dióxido de carbono por ponto de amostragem durante as estações do ano

4.3.2.1 Variabilidade sazonal e espacial do dióxido de carbono

O teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 253,8$; $gl = 6$; $p\text{-valor} = 0,001$) demonstrou que o comportamento do dióxido de carbono variou significativamente de acordo com os pontos de amostragem. De forma

complementar, o teste DCSF (Anexo C) indicou ausência de diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os pontos da Sala de Leitura I, bem como entre os valores registados na Sala de Leitura II e no Gabinete I. Por outro lado, o comportamento do poluente no depósito de livros mostrou-se heterogéneo, tanto internamente quanto em comparação com os demais pontos.

Com relação à influência da sazonalidade sobre o comportamento do CO_2 identificou-se diferenças significativas entre as estações do ano monitorizadas. Diante disso, o teste DCSF (Anexo C) revelou comportamentos distintos entre todos os períodos. Essa observação pode corroborar para a influência de fatores como a ocupação da biblioteca e proximidade dos ocupantes com a estação de monitorização como fatores responsáveis pelas oscilações percebidas, uma vez que a primavera e o inverno apresentaram ocupações discrepantes das observadas no outono. Apesar disso, o inverno e a primavera ainda assim apresentaram diferenças estatisticamente relevantes entre si.

4.3.3 Compostos orgânicos voláteis

Os COVs constituem um conjunto de mais de 900 substâncias, cuja principal característica é a alta pressão de vapor e baixa solubilidade em água em condições normais de temperatura e pressão. A Figura 20 apresenta o comportamento das concentrações médias sazonais de COVs nos diferentes pontos de amostragem observados.

Nota-se uma tendência geral de aumento da concentração de COVs no inverno, sendo observadas exceções nos pontos A8 e C2. No ponto A8, uma das possíveis causas identificadas é a presença de um vazamento na tubagem de águas residuais, o qual provocou a acumulação de água no chão do depósito de livros, próximo a este ponto. Para além disso, foi observado um odor característico resultante do vazamento. As concentrações observadas em A8 oscilaram entre 71,83 ppb e 109,6 ppb.

Já o ponto A4, apesar de se encontrar também no depósito de livros, foi menos impactado pelo vazamento, apresentando concentrações médias que variaram entre 61,40 ppb e 100,53 ppm. Cabendo ressaltar que a maior concentração foi observada durante o inverno. A baixa influência do vazamento sobre esse ponto pode estar relacionado com dois fatores: a distância entre o ponto e o vazamento; e a proximidade do ponto de amostragem com a porta que conecta o depósito de livros ao exterior.

As menores concentrações de COVs foram observadas nos pontos C1 (36,34 ppm) e C3 (30,44 ppm) durante o outono. Já a maior concentração média do poluente foi monitorizada no ponto C2 (153,83 ppm) durante a primavera.

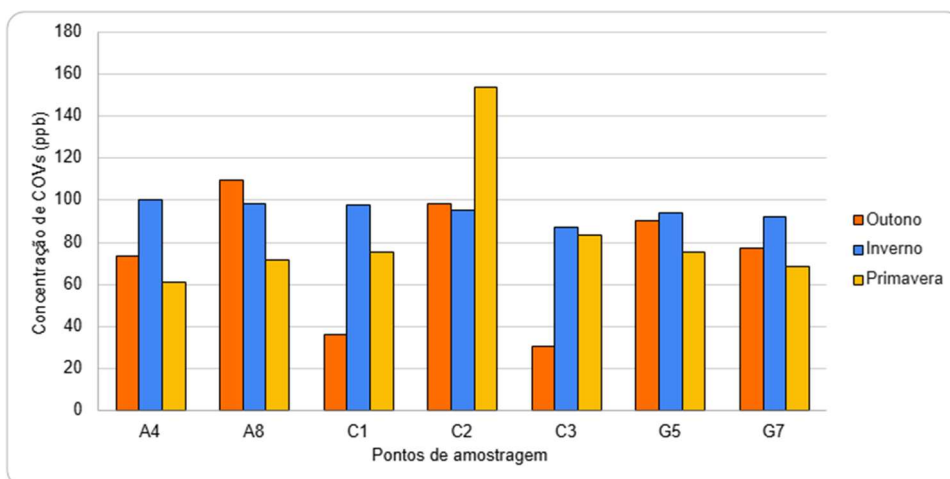


Figura 20 Concentrações médias sazonais de compostos orgânicos voláteis por ponto de amostragem

A Figura 21 apresenta o comportamento diário das concentrações de COVs nos diferentes pontos de amostragem. De forma geral, observa-se um aumento da concentração média dos COVs a partir das 16h. Antes desse período, os grupos apresentam uma certa estabilidade de concentração, com exceção de A8, que demonstrava uma tendência de redução. Observa-se uma possível relação entre a ocupação da biblioteca e a concentração de COVs, uma vez que os picos de poluentes ocorreram entre as 16h e as 19h, considerados os horários de pico de utilização da biblioteca.

Ademais, um ponto que chama a atenção são os picos observados em C2. Uma possível explicação para esse comportamento anômalo pode estar associada às medições microbiológicas. Durante estas medições (que ocorriam entre as 9h e as 10h30 e entre as 16h30 e as 18h00), as mesas precisavam de ser desinfetadas para servirem de apoio à montagem do amostrador. O desinfetante utilizado foi álcool a 70%, composto por etanol e água. Importa destacar que o etanol é um COV.

Dessa forma, os picos observados próximos a esses horários evidenciam uma possível interferência dos processos de desinfecção nas medições de COVs. O que chama a atenção é o facto de tal comportamento ter sido observado mesmo respeitando-se a distância mínima de 2 metros da estação de medição de gases.

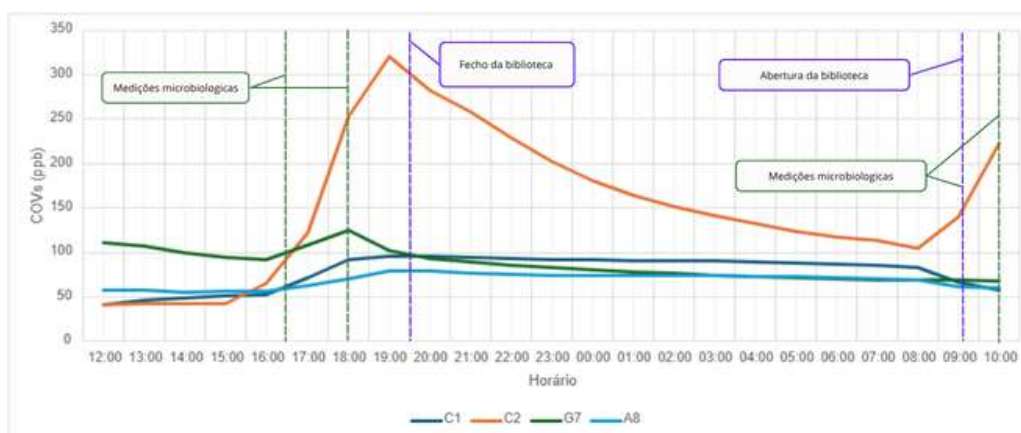


Figura 21 Variações diárias da concentração de COVs com indicação dos momentos de abertura, encerramento da biblioteca e medições microbiológicas

Este fenómeno de interferência da utilização de desinfetantes sobre a qualidade do ar interior foi também observado por Jiang et al. (2021), ao estudarem o comportamento de dispersão do etanol em ambientes interiores e os seus efeitos sobre as características do ar. Os autores verificaram que os desinfetantes à base de etanol provocaram alterações repentinas na composição química do ar interior. As concentrações de COVs aumentaram imediatamente após a aplicação dos produtos, permanecendo elevadas durante o tempo de contacto com a superfície e diminuíram gradualmente após a limpeza. Entre os compostos gerados no processo de desinfeção destacam-se: etanol, acetaldeído e formaldeído, com concentrações variando entre sub-ppb e ppm.

Embora este fenómeno tenha sido observado de forma mais evidente em C2 (Figura 21), também se verificou no ponto A8, que apresentou um pico entre as 16h30 e as 18h. O menor pico pode indicar que a distância entre o ponto de amostragem e a fonte emissora de foi relativamente maior. Uma medição microbiológica foi igualmente realizada em C1, durante a manhã, não tendo, no entanto, provocado efeitos tão perceptíveis quanto os observados em C2 e A8. Apesar destas possíveis interferências nos dados, os valores médios observados mantêm-se dentro do intervalo reportado na literatura (Lee et al., 2021; Ferreira & Cardoso, 2013).

Relativamente à origem das emissões de COVs no interior, a Figura 22 apresenta a razão I/E das concentrações observadas. Verifica-se que, especialmente na primavera e no inverno, a origem dos COVs é predominantemente do interior da biblioteca. Destaca-se, em particular, a elevada taxa de emissão interna observada em C2 durante a primavera, reforçando a possibilidade de contaminação localizada neste ponto.

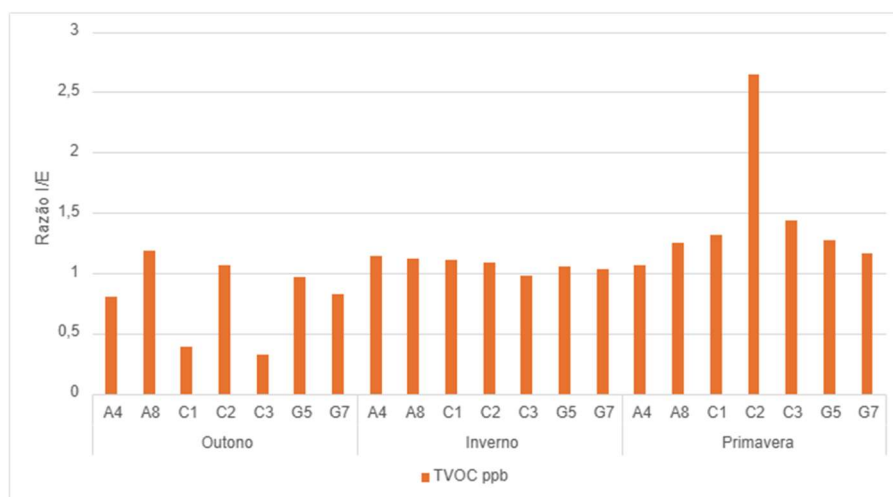


Figura 22 Razão I/E do COVs

4.3.3.1 Variabilidade sazonal e espacial dos compostos orgânicos voláteis

O teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 74$; gl = 6; p-valor = 0,001) revelou diferenças estatisticamente significativas entre os espaços avaliados. De forma complementar o teste de DCSF (Anexo C) indicou o comportamento divergente entre C2 e a maioria dos pontos de amostragem, reforçando a hipótese que contaminação ou interferência específica neste ponto, seja pela presença de ocupantes ou pelo processo de desinfeção. O único ponto que não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$) com C2 foi o ponto G5.

Embora os pontos G5 e G7 apresentem muitas características semelhantes quando comparados com os demais parâmetros avaliados, exibem comportamentos significativamente distintos ($p < 0,05$) entre si. Essas diferenças podem estar relacionadas a características distintas da ocupação, uma vez que a ocupação de G5 é contínua, enquanto a de G7 não. Outras duas possíveis causas a considerar são as diferenças no mobiliário e nos materiais presentes nas salas, bem como o sistema de climatização. Apesar dessas hipóteses, é difícil estabelecer uma justificativa definitiva.

No que diz respeito à sazonalidade, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 88$; $gl = 6$; $p\text{-valor} = 0,001$) revelou diferenças estatisticamente significativas. Os resultados da comparação múltipla (Anexo C) realizada, sendo possível observar que o comportamento das concentrações de COVs difere estatisticamente entre todas as estações estudadas. Podendo essas divergências serem fruto das alterações na ocupação dos espaços e observação de poluentes, como vazamento de águas residuais no acervo e pelos processos de climatização.

4.3.4 Formaldeído

O formaldeído é um dos compostos orgânicos voláteis mais comuns encontrados em ambientes interiores. Apesar disso, representa uma preocupação significativa do ponto de vista da saúde humana e da preservação do acervo. Na Figura 23, está representado o comportamento das médias sazonais de CH_2O para cada um dos pontos de amostragem analisados.

Os valores médios de formaldeído observados foram relativamente baixos, com concentrações variando entre 0 ppb e 3,409 ppb. De forma geral, as maiores concentrações do poluente foram registadas durante a primavera, com exceção dos pontos A8 e C1, que apresentaram comportamento distinto. As maiores concentrações médias foram registadas nos pontos G5 (3,16 ppb), C2 (3,14 ppb) e C1 (3,11 ppb). Não foram detetadas concentrações de CH_2O no ponto A4 durante o inverno, e no ponto C3 durante o outono e o inverno.

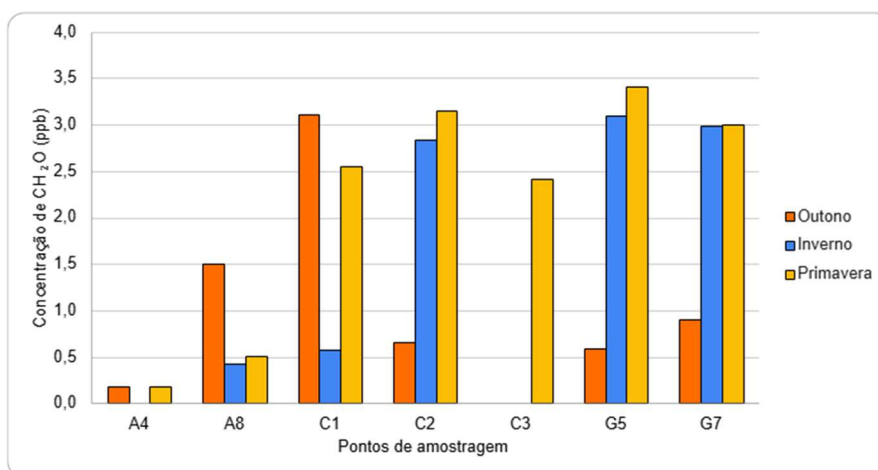


Figura 23 Concentração média sazonal do formaldeído por ponto de amostragem

Ao se comparar esses resultados com dados de outros estudos realizados em bibliotecas, verifica-se que os valores encontrados nesta pesquisa estão consideravelmente abaixo dos relatados na literatura, a qual aponta concentrações variando entre 8 e 97 ppb (Yang, 2017; Fantuzzi et al., 1996; Wu et al., 2018; Kim et al., 2013).

Outro ponto de divergência entre os resultados monitorizados e a bibliografia está no local de maior concentração do poluente. De acordo com Wu et al. (2018), as maiores concentrações de formaldeído foram encontradas em ambientes destinados exclusivamente para o armazenamento dos livros. Já na presente pesquisa o depósito de livros (pontos A4 e A8) está entre os pontos com as menores concentrações médias, variando entre 0 e 1,5 ppb. Entre as justificativas elencadas pelos autores estão biodegradação dos livros e a presença de materiais e de itens do mobiliário que são capazes de emitir o poluente. Diante deste cenário, as baixas concentrações monitorizadas no depósito de livros podem ser associadas a baixos ou inexistentes processos de biodegradações dos materiais e a baixa emissão do poluente a partir do mobiliário.

Quanto à origem das concentrações de formaldeído, foi utilizada a razão I/E (Figura 24) para identificar sua procedência. De forma geral, os dados indicaram que as concentrações se originavam predominantemente no interior das edificações. As exceções a essa tendência foram os pontos A4 (no outono e na primavera) e G5 (no outono). Em alguns casos, como nos pontos C3 (no outono e no inverno) e A4, não foram detectadas concentrações internas durante o período analisado. Além disso, não foram registradas concentrações externas detectáveis do poluente, neste caso embora não seja possível calcular matematicamente a razão I/E é uma taxa considerada altíssima. Desta forma essa taxa na Figura 24 foi representada com uma razão de 12.

A presença de formaldeído em ambientes interiores está geralmente associada a materiais de acabamento, mobiliários, itens de decoração e o uso de adesivos (ABNT, 2023). Apesar dessas serem as principais fontes descritas na literatura, durante o período de estudo não foram identificadas alterações relevantes relacionadas a esses materiais. Outro fator que pode influenciar a dinâmica de liberação de formaldeído é a variação da temperatura e da umidade relativa do ar (Kim et al., 2013). No entanto, embora essa hipótese seja plausível, é difícil estabelecer com precisão as causas do aumento das concentrações internas observadas.

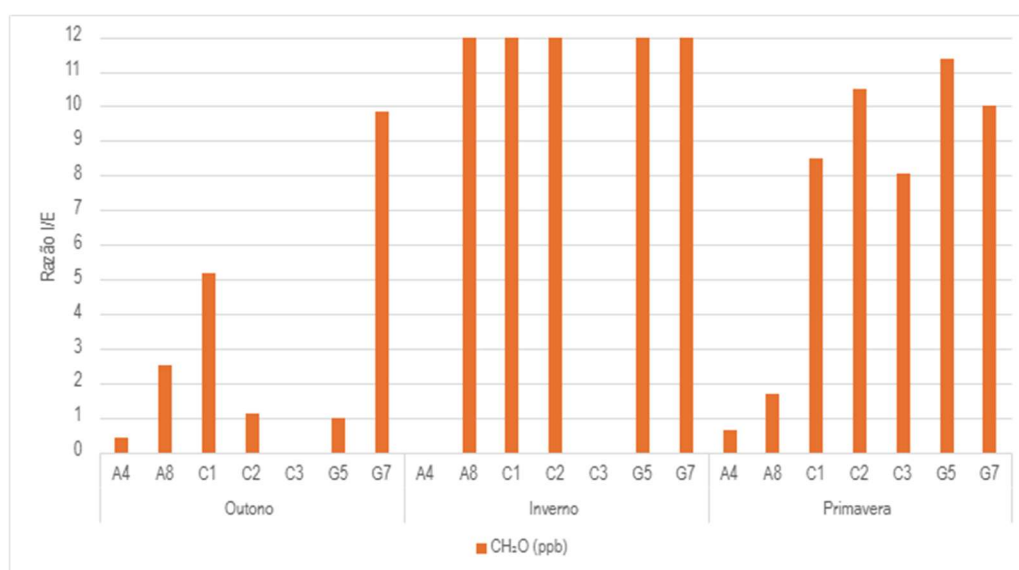


Figura 24 Variações sazonais da razão I/E de formaldeído por ponto de amostragem durante as estações do ano estudadas

4.3.4.1 Variabilidade sazonal e espacial do formaldeído

O teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 96,7$; $gl = 6$; p -valor = 0,001) indicou divergências estatisticamente significativas entre os pontos de amostragem. Complementarmente, o teste DCSF (Anexo C) apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os pontos A4 e A8 em relação à maioria dos outros grupos. O ponto A4 não apresentou compatibilidade estatística com nenhum dos demais pontos, enquanto o ponto A8 apresentou semelhanças com os pontos C3 e C2. Os demais pontos de amostragem não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si.

Diferenças significativas na quantidade e concentração de fonte poluidoras não foram observadas entre os espaços estudados. Neste cenário, as variações do comportamento deste poluente podem estar associadas a características de ocupação dos espaços ou a características de ventilação. Apesar destes apontamentos, a definição exata dos fatores que influenciaram essa oscilação continua sem explicações claras.

Quanto à distribuição sazonal do formaldeído, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 28,7$; $gl = 2$; p -valor = 0,001) também apontou diferenças estatisticamente significativas entre as estações do ano. O teste de DCSF (Anexo C) demonstrou que o outono se diferencia significativamente das demais estações, enquanto não foram observadas divergências estatisticamente relevantes entre os dados da primavera e do inverno.

4.3.5 Avaliação da conformidade legal

A avaliação da conformidade legal da concentração de poluentes gasosos utiliza como base a Portaria n.º 138-G/2021. As Figuras 25, 26, 27 e 28 apresentam as concentrações dos poluentes monitorizados e os respetivos limiares de proteção estabelecidos pela legislação. Observa-se que, em todos os casos, as concentrações dos poluentes analisados mantiveram-se abaixo do limite máximo permitido. Diante deste cenário, do ponto de vista da conformidade legal dos poluentes gasosos, pode afirmar-se que a biblioteca se encontra em consonância com a legislação vigente.

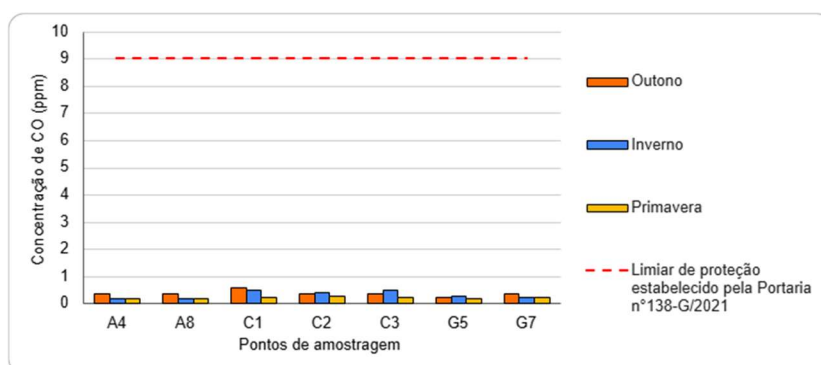


Figura 25 Concentrações médias de CO e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n.º 138-G/2021

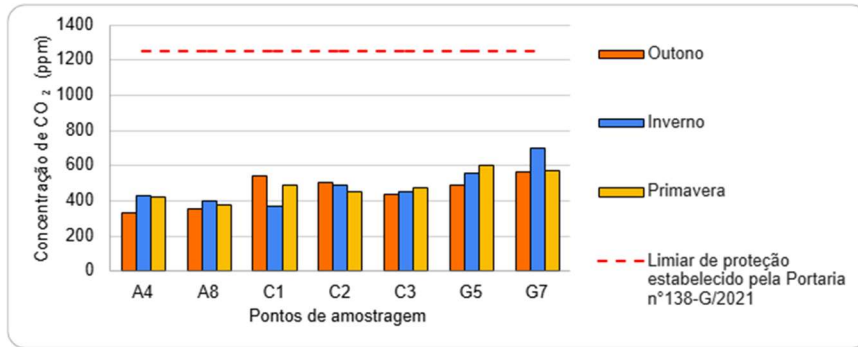


Figura 26 Concentrações médias de CO₂ e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n°138-G/2021

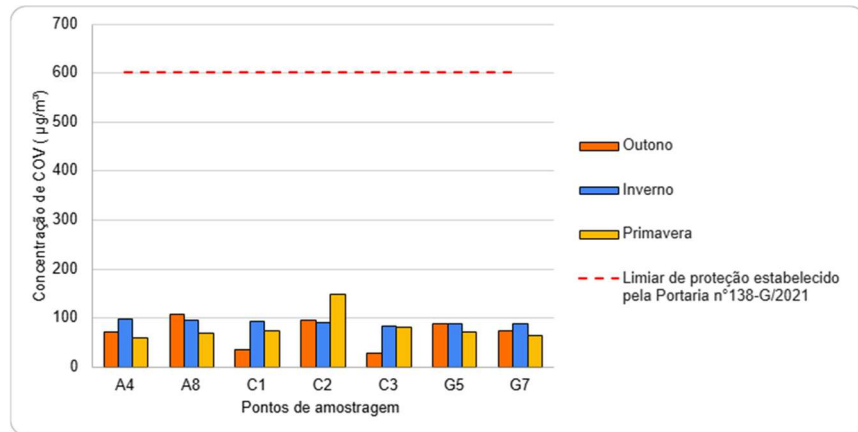


Figura 27 Concentrações médias de COVs e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n°138-G/2021

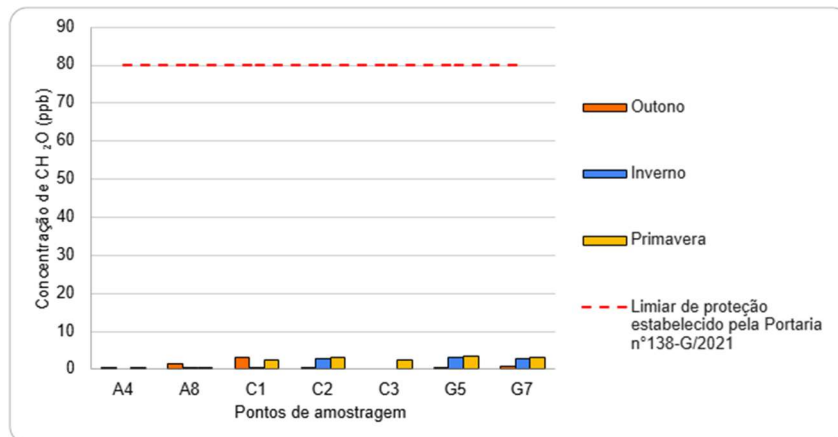


Figura 28 Concentrações médias de CH₂O e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n°138-G/2021

4.4 Material Particulado

A Tabela 26 apresenta os valores médios, desvios padrão, mínimos e máximos dos materiais particulados PM_{2,5} e PM₁₀ durante as estações do ano estudadas.

Tabela 26 Material Particulado do ar nos diferentes pontos de amostragem durante as estações do ano

Ponto de amostragem *	Estação do ano	Méd ± Dp	PM _{2,5} (µg/m ³)			PM ₁₀ (µg/m ³)		
			Mín - Max	±	-	±	-	±
A4	Outono	Méd ± Dp	21,30	±	7,96	43.20	±	15.357
		Mín - Max	5,28	-	38,17	13.690	-	75.08
	Inverno	Méd ± Dp	7,70	±	2,72	9.40	±	3.394
		Mín - Max	2,39	-	11,93	4.017	-	17.61
	Primavera	Méd ± Dp	2,52	±	0,94	3.44	±	1.467
		Mín - Max	1,12	-	3,95	1.300	-	7.99
A8	Outono	Méd ± Dp	10,03	±	6,48	21.42	±	12.540
		Mín - Max	2,62	-	21,79	7.680	-	43.96
	Inverno	Méd ± Dp	3,63	±	2,37	4.14	±	2.642
		Mín - Max	1,25	-	7,91	1.329	-	9.30
	Primavera	Méd ± Dp	3,08	±	1,39	3.53	±	1.443
		Mín - Max	1,06	-	6,43	1.530	-	7.28
C1	Outono	Méd ± Dp	10,53	±	3,39	31.72	±	12.141
		Mín - Max	4,21	-	14,59	17.813	-	63.95
	Inverno	Méd ± Dp	6,28	±	4,68	7.54	±	5.955
		Mín - Max	1,97	-	21,51	2.033	-	28.28
	Primavera	Méd ± Dp	3,08	±	1,39	3.53	±	1.443
		Mín - Max	1,08	-	5,28	2.230	-	23.89
C2	Outono	Méd ± Dp	13,78	±	7,60	34.33	±	15.644
		Mín - Max	5,68	-	33,44	15.409	-	72.52
	Inverno	Méd ± Dp	10,90	±	5,33	13.78	±	8.261
		Mín - Max	2,95	-	31,23	4.581	-	45.47
	Primavera	Méd ± Dp	2,73	±	0,25	3.63	±	0.867
		Mín - Max	2,17	-	3,25	2.880	-	6.34
C3	Outono	Méd ± Dp	7,34	±	2,89	23.40	±	11.543
		Mín - Max	2,72	-	10,04	7.480	-	36.15
	Inverno	Méd ± Dp	10,61	±	6,84	13.62	±	8.596
		Mín - Max	3,06	-	31,57	3.845	-	33.69
	Primavera	Méd ± Dp	2,99	±	0,69	4.40	±	1.800
		Mín - Max	1,65	-	4,21	2.790	-	11.98
G5	Outono	Méd ± Dp	4,89	±	2,39	16.72	±	11.260
		Mín - Max	2,16	-	9,47	6.430	-	40.43
	Inverno	Méd ± Dp	12,31	±	8,98	19.00	±	13.966
		Mín - Max	3,07	-	32,05	3.752	-	47.99
	Primavera	Méd ± Dp	5,40	±	2,58	11.14	±	1.991
		Mín - Max	2,75	-	9,53	7.580	-	12.77
G7	Outono	Méd ± Dp	7,63	±	4,15	24.49	±	10.869
		Mín - Max	2,40	-	14,77	9.120	-	39.48
	Inverno	Méd ± Dp	2,37	±	0,83	3.39	±	2.515
		Mín - Max	1,52	-	5,59	1.700	-	12.54
	Primavera	Méd ± Dp	6,00	±	2,48	9.08	±	5.054
		Mín - Max	3,47	-	11,09	4.260	-	22.49

* A4 e A8- Depósito de livros; C1, C2 e C3- Sala de leitura I; G7- Sala de leitura II e G5- Gabinete I.

Na Figura 29, são apresentados os comportamentos do $PM_{2,5}$ ao longo do dia. A concentração do material particulado começa a aumentar a partir das 14h, sendo a maior taxa de crescimento observada entre 15h e 16h. Outro comportamento que chama a atenção é a redução observada no período do almoço (entre 12h30 e 14h). Além disso, no ponto C2, observa-se um aumento na concentração do poluente durante o processo de limpeza da biblioteca, comportamento que não é observado nos demais pontos. Uma possível explicação para esse fenômeno é que, durante o período de limpeza, a porta central da biblioteca é mantida aberta, possibilitando a entrada de material particulado proveniente de outras áreas do edifício. Apesar disso, o aumento efetivo da concentração ocorre após a abertura do espaço.

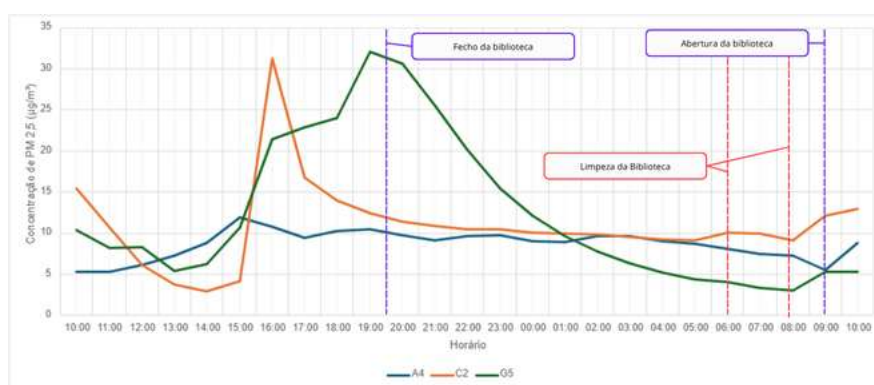


Figura 29 Variação temporal da concentração de $PM_{2,5}$ com indicação dos momentos de limpeza e ligação/fecho do sistema de climatização (campanha de primavera)

O comportamento do PM_{10} , representado no Figura 30, foi similar ao observado para o $PM_{2,5}$. Em especial, os pontos C2 e A4 apresentaram comportamentos muito parecidos para ambos os poluentes. Já em G5, observou-se um padrão diferente: ocorreram dois picos de concentração, um às 16h e outro às 19h. Como esse comportamento não foi observado para o $PM_{2,5}$, pode-se afirmar que, especialmente o pico das 16h, resulta da inserção de partículas com dimensões superiores a $2,5 \mu m$. Apesar da identificação desse fenômeno, é difícil afirmar com certeza sua causa.

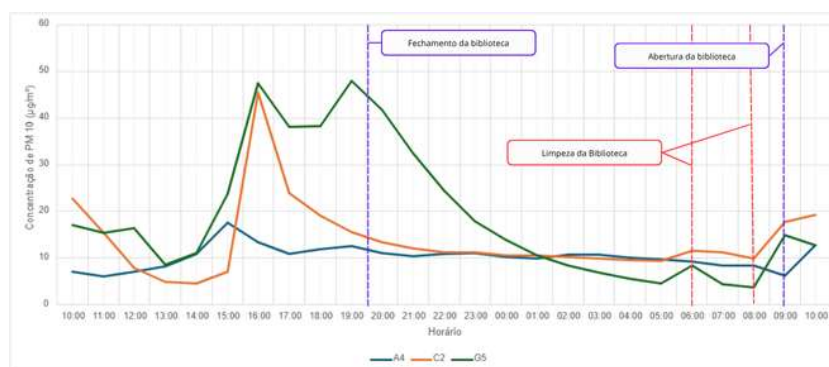


Figura 30 Variação temporal da concentração de PM_{10} com indicação dos momentos de limpeza e ligação do sistema de climatização (campanha de primavera)

Ao avaliar os comportamentos representados nas Figuras 29 e 30, nota-se que a dinâmica do material particulado pode estar relacionada à ocupação dos espaços, às atividades desenvolvidas e às variações nos processos de ventilação. Isso se deve ao fato de que todas essas variáveis podem influenciar tanto na emissão quanto na ressuspensão do material particulado sedimentado (NASEM, 2024).

Na Figura 31, apresentam-se os valores médios de PM_{10} e $PM_{2,5}$ observados nos pontos de amostragem durante as diferentes estações do ano. Com relação ao $PM_{2,5}$ as maiores concentrações médias foram observadas durante o outono em A4 (21,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e C2 (13,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), além do inverno em G5 (12,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por outro lado, os menores valores médios foram observados na primavera em C1 (3,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e A4 (2,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e no inverno em G7 (2,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). As concentrações médias de $PM_{2,5}$ variaram entre 21,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 2,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo a observadas concentrações menores do poluente durante a primavera e as maiores durante o outono.

No que diz respeito ao PM_{10} , as maiores concentrações foram observadas no outono nos pontos A4 (43,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), C2 (34,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e C1 (31,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Em contraposição, as menores concentrações ocorreram durante a primavera em C1 (3,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e A4 (2,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), e no inverno em G7 (3,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). As concentrações médias do poluente variaram entre 2,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 43,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ apresentando uma tendência de redução das concentrações entre o outono e a primavera.

Neste sentido, nota-se que o PM_{10} e o $PM_{2,5}$ apresentaram comportamento similares. Um ponto de destaque é a proximidade de concentrações dos dois poluentes especialmente na primavera nos pontos A4, A8 e C2, e no inverno em G7. A proximidade entre as concentrações dos poluentes indica que parte significativa do PM_{10} é formado por $PM_{2,5}$. Já nos pontos A4, C1 e C2 do inverno observaram-se as maiores discrepâncias entre os dois poluentes, indicando uma maior diversidade de diâmetros de partícula presente no PM_{10} .

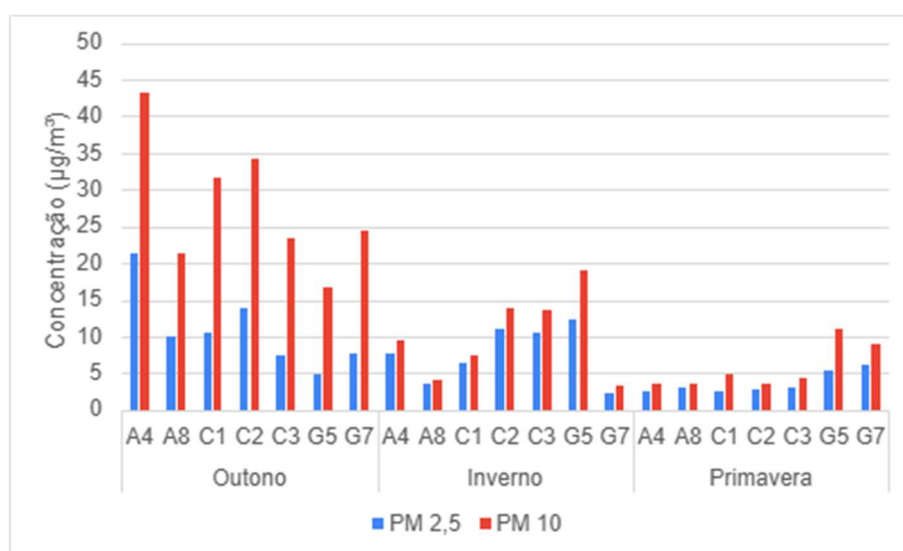


Figura 31 Variações sazonais da razão I/E de PM_{10} e $PM_{2,5}$ por ponto de amostragem durante as estações do ano

As faixas de concentração de PM₁₀ e PM_{2,5} observadas encontram-se dentro do descrito por Güneş et al. (2022). Os autores encontraram concentrações de PM_{2,5} entre 0 µg/m³ e 49µg/m³ e de PM₁₀ entre 0 µg/m³ e 81µg/m³. Além disso, as maiores concentrações de ambos os poluentes também foram encontrados nos mesmos meses descritos pelos autores.

Buscando definir a origem do PM₁₀ e PM_{2,5} observados no interior calculou se a razão I/E (Figura 32). O PM_{2,5} nos meses do outono e inverno se originaram maioritariamente no interior da edificação. Durante o outono a razão se manteve acima de 1, em todos os pontos, com exceção de G5. No inverno apenas A8, C1 e G7 se mantiveram abaixo de 1. E por fim na primavera todos os pontos de amostragem permaneceram abaixo de 1.

Em relação ao PM₁₀, no outono a razão I/E manteve-se acima de 1, com exceção dos pontos A8 e G5, indicando que as concentrações observadas no interior foram predominantemente emitidas no próprio interior. Já no inverno e na primavera, as razões I/E permaneceram abaixo de 1 em todos os pontos estudados, o que indica que as concentrações observadas se originaram no exterior e foram introduzidas para o interior.

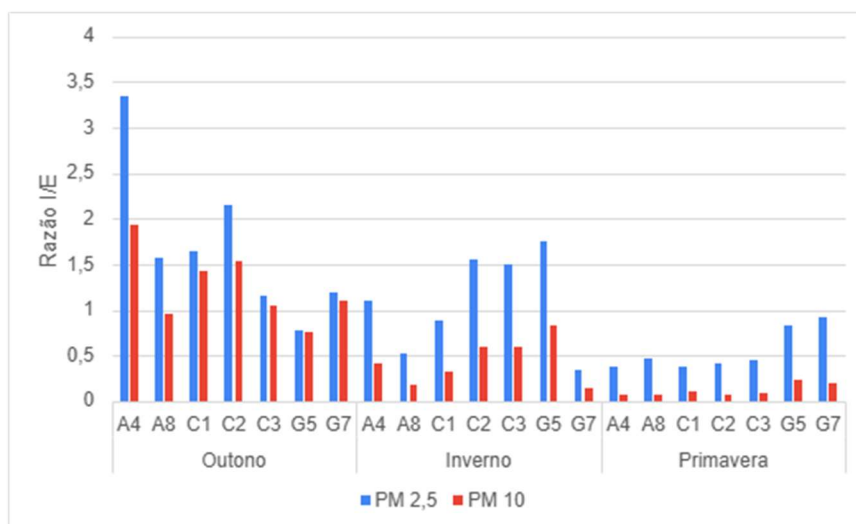


Figura 32 Variações sazonais da razão I/E de Material Particulado por ponto de amostragem durante as estações do ano

4.4.1 Variabilidade sazonal e espacial do Material Particulado

O teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 144$; gl = 6; p-valor = 0,001) indicou divergências estatisticamente significativas entre os pontos de amostragem para o PM_{2,5}. A partir do teste DCSF (Anexo C) observou-se que os pontos A8 e G7 apresentaram diferenças significativas quando comparados com todos os grupos, com exceção das comparações entre os dois pontos. O ponto A8 também apresentou divergências com todos os grupos analisado, com exceção de G5. Um aspeto interessante verificado foi a ausência de divergências significativas entre os pontos da Sala de Leitura I, podendo indicar que espaços com o mesmo tipo de ocupação e ventilação tendem a ter comportamentos similares.

Com relação ao PM₁₀, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 156$; gl = 6; p-valor = 0,001) também demonstrou diferenças significativas. Assim como o observado para o PM_{2,5}, o teste de DCSF (Anexo

C) demonstrou que A8 e G7 divergiram significativamente ($p < 0,05$) de todos os grupos analisados, com exceção à comparação entre os dois. Apesar desta similaridade entre as distribuições dos poluentes, a homogeneidade observada na Sala de Leitura I não foi percebida para PM_{10} , uma vez que C2 e C3 apresentaram comportamentos estatisticamente discrepantes entre si.

Em relação à influência da sazonalidade sobre o $PM_{2,5}$, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 260,8$; $gl = 2$; p -valor = 0,001) e o pós teste de DCSF (Anexo C) mostraram divergências significativas entre os períodos estudados. De forma similar o PM_{10} demonstrou divergências significativas ($\chi^2 = 348$; $gl = 2$; p -valor = 0,001) entre todos os períodos avaliados.

4.4.2 Conformidade legal de Material Particulado

A avaliação da conformidade legal de Material Particulado utiliza como base a Portaria n° 138-G/2021. Este documento estabelece que a média das concentrações mássicas de PM_{10} e $PM_{2,5}$ não podem ultrapassar $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente. Diante disso, a Figura 33 apresenta as concentrações de $PM_{2,5}$ corrigidas para as condições de temperatura e pressão estabelecido pela legislação. Observa-se que nenhum dos valores observados se encontra acima do limite legal. De forma, semelhante ao observado para $PM_{2,5}$, as concentrações médias de PM_{10} , encontram-se abaixo da concentração estabelecida pela legislação (Figura 34).

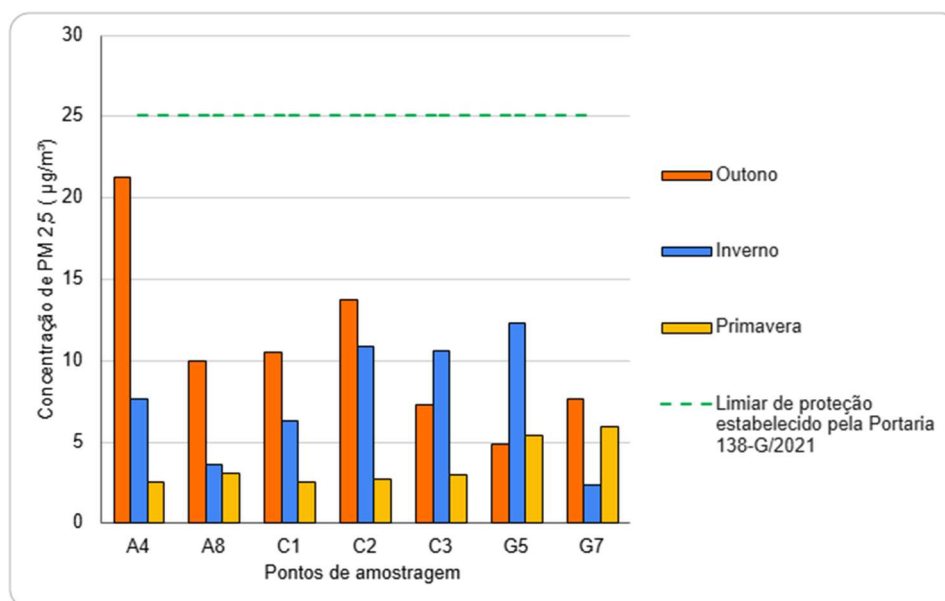


Figura 33 Concentrações médias de $PM_{2,5}$ e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n°138-G/2021.

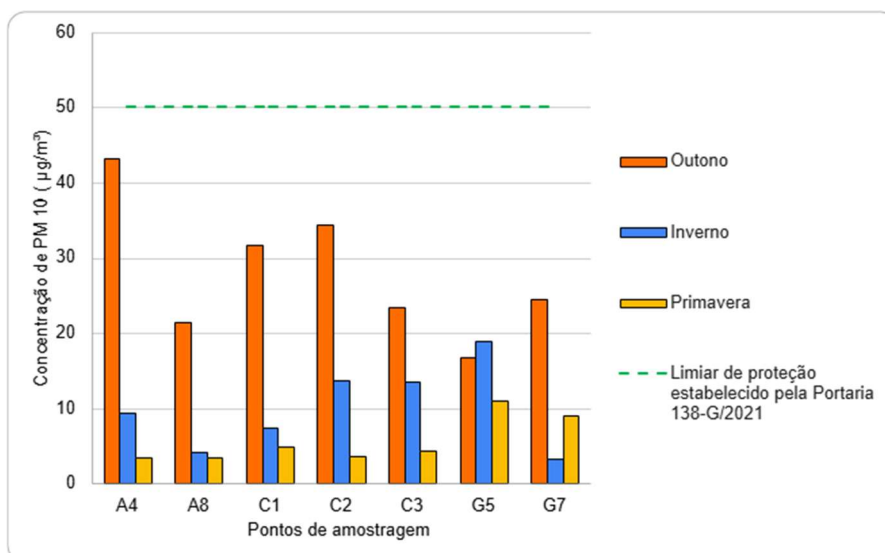


Figura 34 Concentrações médias de PM₁₀ e limiar de proteção estabelecido pela Portaria n°138-G/2021

4.5 Parâmetros microbiológicos

4.5.1 Fungos

Os fungos desempenham um papel fundamental na biodeterioração de materiais em ambientes fechados, como bibliotecas, arquivos e museus. A Tabela 27 apresenta os valores médios, desvios-padrão, mínimos e máximos de fungos durante as estações do ano estudadas (outono, inverno e primavera), no período da manhã e tarde.

A distribuição fúngica em ambientes internos pode ser influenciada por diversos fatores, tais como: tipo de ventilação; parâmetros ambientais, como humidade relativa e temperatura; taxa de ocupação do ambiente; características estruturais; concentrações fúngicas no exterior das edificações; entre outros. Diante disso, é comum oscilações nos valores médios observados na literatura.

No caso da presente investigação, as concentrações médias de fungos variaram entre 6,67 UFC /m³ e 181,11 UFC /m³ no período da manhã, e entre 5,56 UFC /m³ e 20,83 UFC /m³ para as amostragens realizadas durante a tarde. Observa-se que as concentrações de fungos durante a manhã foram superiores às do período da tarde, apesar dos picos de ocupação destes espaços terem sido comumente registados no período da tarde (das 16h às 19h). Deste modo, a ocupação parece não influenciar significativamente este parâmetro. Por outro lado, o sistema de climatização e os seus efeitos sobre as trocas de ar no interior da biblioteca podem estar relacionados com a redução das concentrações de fungos no período da tarde. Uma das hipóteses para justificar esse fenómeno é a presença de materiais colonizados por fungos no interior dos compartimentos. Diante disso, com a redução da ventilação durante o período de não funcionamento da UTA, a concentração de esporos fúngicos no ar aumenta. Por outro lado, ao longo do dia, com o funcionamento do sistema de ventilação, as concentrações reduzem.

Tabela 27 Concentração de fungos (UFC/m³) no ar nos pontos de amostragem durante as estações do ano

Ponto de amostragem *	Estação do ano		Fungos (UFC/m ³)					
			Manhã			Tarde		
A4	Outono	Méd ± Dp	77,50	±	68,39	17,5	±	11
		Mín - Max	20,00	-	170,0	0	-	30
	Inverno	Méd ± Dp	168,33	±	245,64	5,56	±	3,91
		Mín - Max	0,00	-	535,0	0	-	10
	Primavera	Méd ± Dp	6,67	±	4,33	13,89	±	6,51
		Mín - Max	0,00	-	25,0	0	-	30
A8	Outono	Méd ± Dp	46,67	±	23,80	11,67	±	8
		Mín - Max	15,00	-	75,0	5	-	25
	Inverno	Méd ± Dp	101,67	±	132,31	5,56	±	5
		Mín - Max	0,00	-	290,0	0	-	15
	Primavera	Méd ± Dp	7,78	±	6,67	6,11	±	4
		Mín - Max	0,00	-	20,0	0	-	10
C1	Outono	Méd ± Dp	114,17	±	111,51	15	±	10,95
		Mín - Max	30,00	-	265,0	5	-	35
	Inverno	Méd ± Dp	14,44	±	8,46	18,89	±	20,58
		Mín - Max	0,00	-	30,0	0	-	60
	Primavera	Méd ± Dp	21,11	±	22,33	9,44	±	4
		Mín - Max	0,00	-	65,0	5	-	15
C2	Outono	Méd ± Dp	102,50	±	113,08	20,83	±	17
		Mín - Max	20,00	-	265,0	0	-	40
	Inverno	Méd ± Dp	15,00	±	6,12	10	±	8
		Mín - Max	5,00	-	25,0	0	-	20
	Primavera	Méd ± Dp	14,44	±	8,82	12,22	±	9
		Mín - Max	0,00	-	30,0	0	-	25
C3	Outono	Méd ± Dp	108,33	±	102,70	18,33	±	16
		Mín - Max	25,00	-	240,0	0	-	45
	Inverno	Méd ± Dp	15,00	±	07,07	10	±	8
		Mín - Max	5,00	-	25,0	0	-	25
	Primavera	Méd ± Dp	8,89	±	5,46	6,67	±	3
		Mín - Max	0,00	-	15,0	5	-	10
G5	Outono	Méd ± Dp	100,00	±	113,00	17,5	±	12,14
		Mín - Max	15,00	-	250,0	0	-	35
	Inverno	Méd ± Dp	181,11	±	257,98	15	±	7,91
		Mín - Max	5,00	-	580,0	5	-	25
	Primavera	Méd ± Dp	6,67	±	4,33	13,89	±	6,51
		Mín - Max	0,00	-	15,0	5	-	25
G7	Outono	Méd ± Dp	82,50	±	83,77	20,83	±	7
		Mín - Max	15,00	-	215,0	10	-	30
	Inverno	Méd ± Dp	17,78	±	09,05	16,11	±	10,24
		Mín - Max	5,00	-	30,0	0	-	30
	Primavera	Méd ± Dp	10,56	±	10,74	12,22	±	7,55
		Mín - Max	0,00	-	30,0	5	-	25

* A4 e A8- Depósito de livros; C1, C2 e C3- Sala de leitura I; G7- Sala de leitura II e G5- Gabinete I.

Notou-se também diferenças entre os valores mensurados nos ambientes com climatização e sem climatização. Os ambientes com UTA apresentaram valores médios entre 6,67 UFC /m³ e 181,11 UFC /m³ e nos ambientes não climatizados (depósito de livros) variaram entre 5,56 UFC /m³ e 168,33 UFC /m³. Vários estudos referem concentrações fúngicas em ambientes climatizados entre 18,6 UFC /m³ e 428 UFC /m³ (Hassan et al., 2021; Illiopoulou et al., 2024; Valeriani et al., 2017). Embora os valores observados na presente pesquisa se encontrem maioritariamente dentro desta faixa, foram aferidas concentrações abaixo de 18,6 UFC /m³. Esta situação pode estar relacionada a diversas características dos ambientes estudados, como por exemplo a HR. Com efeito, a humidade relativa referida por aqueles autores encontra-se entre 48% a 58%, e as do presente trabalho entre 26,3% a 39%, isto é, mais baixas.

Em relação aos pontos de amostragem localizados em ambientes não climatizados (5,56 UFC /m³ e 168,33 UFC /m³), notou-se também valores inferiores aos observados pela literatura. Sahab et al. (2014) examinaram espaços da biblioteca com ventilação natural e ambientes não ventilados (ventilação realizada principalmente por processos de infiltração), tendo verificado em espaços ventilados naturalmente uma tendência maior de acumulação de fungos variando entre 125,8 UFC /m³ e 267,33 UFC /m³, enquanto em ambientes apenas com infiltração oscilaram entre 94,35 UFC /m³ e 369,58 UFC /m³. Neste estudo, os valores de HR observados também se mantiveram entre 44% e 55%, sendo valores relativamente maiores do que os observados em ambientes sem climatização avaliados pela presente pesquisa (variando entre 33% e 39% no depósito de livros).

De acordo com Hameed et al. (2012) é possível observar correlações entre a HR e a concentração total de fungos no ar. Segundo os autores, à medida que a HR aumenta observa-se uma tendência de aumento da concentração total de fungos. De forma complementar, Pasanen et al. (1991) afirmam que a concentração fúngica contida no ar depende da HR, devido às características higroscópicas dos esporos fúngicos. Apesar disso, os autores ressaltam que o desenvolvimento e dispersão fúngica podem variar conforme as espécies estudadas. Mandsen (2012) aponta também a velocidade do ar no interior dos ambientes como um fator chave para a observação de espécies fúngicas no ar.

No período da manhã (Figura 35 e Tabela 27), as maiores concentrações de fungos foram observadas nos pontos G5 (181,11 UFC /m³) e A4 (168,33 UFC /m³) no inverno e no ponto C1 (114,17 UFC /m³) no outono. Os valores médios mais baixos foram observados na primavera nos pontos G5 (6,67 UFC /m³), A8 (7,78 UFC/m³) e C3 (8,89 UFC /m³). De forma geral, percebe-se uma tendência de maiores concentrações médias no período do outono (variando de 46,67 UFC /m³ a 114,17 UFC /m³) e concentrações menores durante a primavera (6,67 UFC/m³ a 21,11 UFC /m³), sendo exceções os pontos A4, A8 e G5 por apresentarem concentrações maiores no inverno, respetivamente de 168,33, 101,67 e 181,11 UFC /m³.

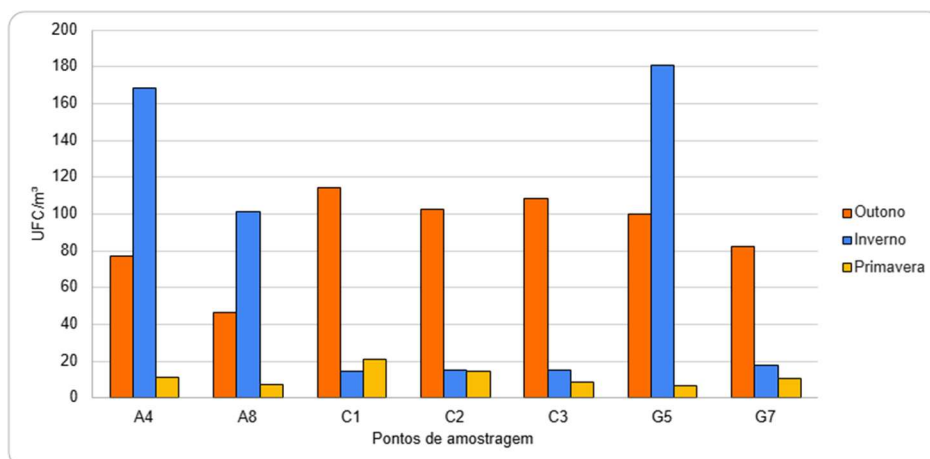


Figura 35 Concentrações médias de fungos (UFC /m³) no período da manhã nos pontos de amostragem durante o estudo.

No período da tarde (Figura 36 e Tabela 27), nota-se também uma tendência geral de concentrações mais altas durante o período de outono e valores mais baixos na primavera, com exceção dos pontos A4, A8 e G5. Assim, no outono as concentrações fúngicas observadas variaram entre 11,67 UFC /m³ e 20,83 UFC /m³, no inverno variaram de 5,56 UFC /m³ a 18,89 UFC /m³ e na primavera entre 6,11 UFC /m³ a 13,89 UFC /m³.

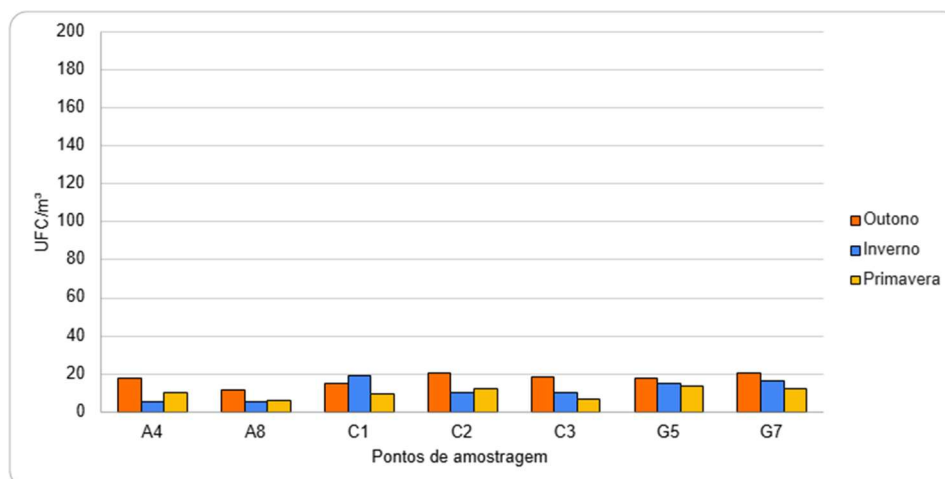


Figura 36 Concentrações médias de fungos (UFC/m³) no período da tarde nos pontos de amostragem durante o estudo.

Os menores valores foram observados no depósito de livros, nomeadamente nos pontos A4 (5,56 UFC /m³) e A8 (5,56 UFC /m³) no inverno e no ponto A8 (6,11 UFC /m³) na primavera. Em contrapartida, os maiores foram observados durante a primavera nos pontos C2 (20,83 UFC /m³), G7 (20,83 UFC /m³) e C3 (18,33 UFC /m³). Diferentemente, do comportamento observado no período da manhã, os ambientes não climatizados foram os que apresentaram concentrações médias menores, em especial A8.

Em relação à origem dos fungos no interior dos espaços, os valores da razão I/E foram inferiores a 1 em todos os pontos de amostragem (Figura 37), indicando que os fungos provêm de fontes externas. Assim, a introdução dos fungos no interior poderá ter ocorrido através do trânsito de pessoas e pelos processos de ventilação (mecânico e infiltração).

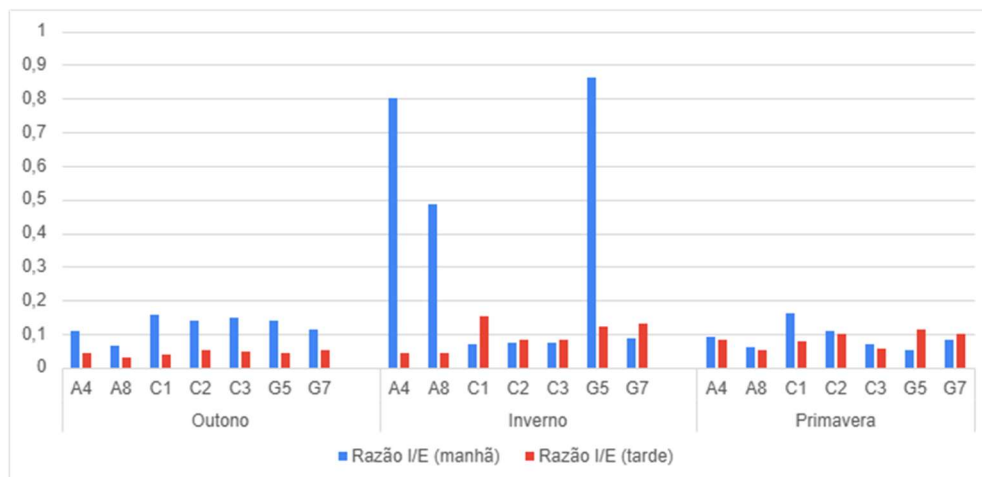


Figura 37 Razão I/E de concentrações de fungos por ponto de amostragem durante as estações do ano

4.5.1.1 Variabilidade espacial e sazonal de fungos

Quanto à variabilidade espacial das amostras no período da manhã, observou-se pelo teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 990$; gl = 6; p-valor = 0,986) a inexistência de variações significativas na concentração de fungos entre os pontos de amostragem, o que indica uma homogeneidade na distribuição fúngica em todos os espaços avaliados.

Em contrapartida, no período da tarde o teste ($\chi^2 = 18$; gl = 2; p-valor = 0,006) revelou a presença de divergências significativas entre os grupos estudados. Ao realizar o pós teste DCSF (Anexo C), notou-se que os únicos pontos que apresentaram comportamentos divergentes ($p < 0,005$) foram os pontos G5 e G7 quando comparados com A8. Neste sentido, percebe-se que os valores mais baixos medidos em A8, fazem com que esse grupo tenha uma distribuição divergente.

No que diz respeito aos impactos da sazonalidade sobre a distribuição fúngica das amostras realizadas no período da manhã, o teste de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 62,1$; gl = 6; $p < 0,001$) revelou diferenças significativas entre os períodos avaliados. De forma complementar, o pós teste de DCSF (Anexo C) mostrou que todas as estações do ano estudadas apresentaram comportamentos discrepantes entre si ($p < 0,05$). No período da tarde observou-se igualmente diferenças significativas na distribuição fúngica ao longo das estações do ano estudadas. Apesar disso, o teste de DCSF observou divergência entre o outono e as demais estações.

Neste sentido, conclui-se que a distribuição fúngica no período da manhã apresenta maior homogeneidade de distribuição quando comparado ao período da tarde. Além disso, observa-se a influência de fatores sazonais sobre a distribuição fúngica, especialmente no período da manhã.

4.5.1.2 Diversidade fúngica

A análise do DNA das amostras revelou a presença de 17 gêneros distintos de fungos (Anexo D e E), designadamente: *Epicoccum*, *Debaryomyces*, *Penicillium*, *Beauveria*, *Botrytis*, *Rhizopus*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Filobasidium*, *Talaromyces*, *Aureobasidium*, *Rhodotorula*, *Fusicolla*, *Boeremia*, *Aspergillus*, *Alternaria* e *Clairireedia*.

Os gêneros que apresentaram maior predominância durante o estudo foram o *Cladosporium* (42,09% - manhã e 29,29% - tarde), *Penicillium* (29,24% - manhã e 31,40% - tarde) e *Aspergillus* (7,26% - manhã e 22,68% - tarde) (Figuras 37 e 38). Estes gêneros são os mais frequentemente encontrados em ambientes internos, tendo sido encontrados em estudos semelhantes (Hayleeyesus & Manaye, 2014; Hassan et al., 2021; Iliopoulou et al., 2024; Valeriani et al., 2017; Sahab et al., 2014; Skóra et al., 2015; Pyrri et al., 2020; Kadaifciler, 2017). A presença destes fungos pode apresentar potenciais riscos para a saúde dos ocupantes, uma vez que algumas espécies destes gêneros são consideradas patogénicas e alergénicas (Public Health Agency of Canada, 2011; Menezes et al., 2017; Bezerra et al., 2014). Além disso, Iliopoulou et al. (2024) alertam ainda, em ambientes de acervos e bibliotecas, a presença dos gêneros *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria* e *Botrytis* podem estar associados a processos de bioedgradação da celulose. Estes gêneros foram identificados no presente estudo no depósito de livros, em A4 e A8, (Figura 38 e 39), devendo merecer especial atenção. Além disso, os autores destacam ainda a correlação entre o género *Beauveria*, também identificado no presente estudo, com insetos, o que pode indicar possíveis riscos de degradação dos materiais por meio de infestações.

Com relação a saúde dos ocupantes, as principais espécies relacionadas ao desenvolvimento de doenças e alergias em ambientes fechados são: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Candida*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium* e *Rhodotorula*. Ao avaliar as frequências relativas destas espécies nos ambientes comumente ocupados (tais como Sala de Leitura I, Sala de Leitura II e Gabinete I) observou se: *Alternaria* (manhã: 1,79% - 5,75%; tarde: 0 - 13,19%), *Aspergillus* (manhã: 2,19% - 6,96%; tarde: 19,94% - 24,54%), *Cladosporium* (manhã: 35,28% - 45,68%; tarde: 24,9% - 33,21%), *Penicillium* (manhã: 25,23% - 46,52%; tarde: 25,9% - 35,01%) e *Rhodotorula* (manhã: 0% - 2,25%; tarde: 0% - 0,64%). Para ambos os períodos de coleta, as observações de gêneros relacionados a riscos a saúde dos ocupantes e a preservação dos materiais é vista como um ponto preocupante.

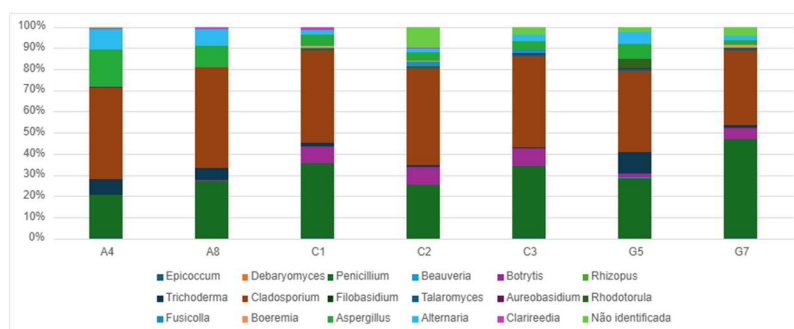


Figura 38 Frequência relativa de gêneros de fungos identificados pela manhã em cada ponto de amostragem durante o estudo

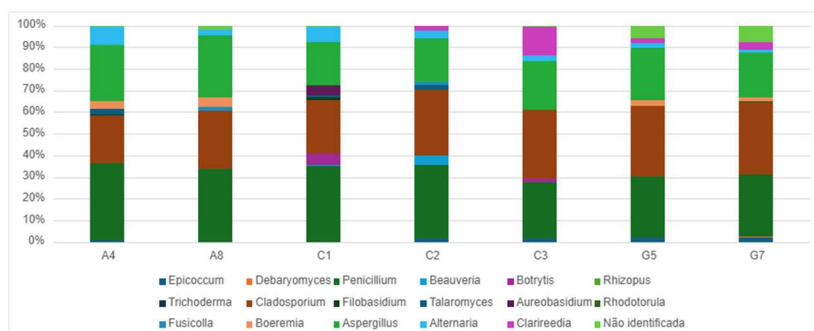


Figura 39 Frequência relativa de gêneros de fungos identificados pela tarde em cada ponto de amostragem durante o estudo

A avaliação da diversidade das amostras nos pontos de amostragem foi realizada a partir do Índice de Diversidade de Simpson (Tabela 28). Observa-se o que índices do período da tarde (0,73 – 0,76) foram mais altos e mais estáveis do que os observados no período da manhã (0,65 – 0,73), o que sugere uma maior diversidade e constância no período da tarde. Esse fenómeno pode estar relacionado com o maior fluxo de pessoas no período da tarde e a maior taxa de ventilação, o que favorece a introdução de novas espécies vinda no exterior. Ao comparar os resultados observados com a literatura notou se que, especialmente durante a tarde, os valores se mantiveram dentro das faixas observadas por Pyrri et al. (2020), o qual observou valores entre 0,70 e 0,79. No período da manhã, os pontos A8, C1, C3 e G7 apresentaram valores inferiores aos descritos pelos autores.

Tabela 28 Índice de diversidade de Simpson (1-D)

Pontos de amostragem *	Índice de Diversidade de Simpson (1-D)	
	Manhã	Tarde
A4	0,73	0,75
A8	0,68	0,73
C1	0,68	0,77
C2	0,71	0,75
C3	0,69	0,76
G5	0,75	0,75
G7	0,65	0,76

* A4 e A8- Depósito de livros; C1, C2 e C3- Sala de leitura I; G7- Sala de leitura II e G5- Gabinete I

4.5.1.3 Conformidade legal

A avaliação da conformidade legal para os parâmetros microbiológicos foi feita com base na Portaria n.º 138-G/2021, que estabelece dois critérios principais para a aceitação: a concentração de fungos no interior não deve superar a do ambiente exterior; e respeitar os limites máximos permitidos para concentrações de determinados gêneros e espécies.

Conforme observado pela razão I/E (Figura 37), as concentrações fúngicas interior se mantiveram abaixo das observadas no exterior durante todas as campanhas e para todos os pontos de amostragem. Desta forma, estando em consonância com o exigido pela Portaria.

No que diz respeito as concentrações máximas para espécies e géneros fúngicos, entre os fungos indicados pela presente investigação a Portaria estabelece limite apenas para a concentração de *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* e *Alternaria*. A mistura entre tais géneros precisa ser inferior à 500 UFC/m³ em cada ponto de amostragem. A máxima concentração total fúngica encontrada durante a investigação foi de 181,11 UFC /m³, diante disso observa-se que a concentração destes géneros sempre se manteve abaixo dos limites estabelecidos. Assim, pode-se afirmar que com relação aos parâmetros fúngicos a biblioteca se encontra de acordo com o estabelecido pela legislação portuguesa vigente.

4.5.2 Bactérias

Como foi referido anteriormente, durante a investigação foram realizadas três campanhas de amostragens microbiológicas, uma para cada estação do ano estudada. No entanto, em nenhuma amostragem foi observado o desenvolvimento de bactérias, ao contrário de outros estudos referidos na bibliografia, (Hayleeyesus & Manaye, 2014; Hassan et al., 2021; Valeriani et al., 2017; Skóra et al., 2015; Cappitelli et al., 2009). A não deteção de bactérias, no presente estudo, pode estar relacionada com as condições ambientais dos espaços avaliados, designadamente a HR e a temperatura. Em estudos realizados em bibliotecas são referidos valores de HR entre 41% e 60% (Hassan et al., 2021, Skóra et al., 2015 e Cappitelli et al., 2009) e no presente estudo foram inferiores a 40%. Com efeito, Lin e Marr (2019) relatam a influência da HR sobre o comportamento dos bioaerossóis bacterianos, apontando principalmente para alterações no tempo de permanência dos bioaerossóis no ar e a viabilidade das bactérias coletadas. Nesse estudo foram avaliados os comportamentos de três espécies diferentes de bactérias, *E. coli* (Gram-negativa), *B. subtilis* (Gram-positiva), *M. smegmatis* (Gram-positiva), para diferentes valores de HR que variaram de 20% até 100%. Os resultados demonstraram uma tendência de viabilidade bacteriana com aumento da HR, sendo observados resultados satisfatórios a partir de 40% de HR. Ademais, o estudo também avaliou a influência da HR na viabilidade temporal das bactérias. Notou-se que após 1 hora a viabilidade bacteriana foi satisfatória apenas em cenários com HR acima de 60%. Diante disso, os valores de HR monitorizados na biblioteca (inferiores a 40%) podem ter influenciado negativamente o desenvolvimento bacteriano. De acordo com Tang (2009), embora haja correlação entre a HR e as dinâmicas dos bioaerossóis a definição de um intervalo ótimo para a viabilidade bacteriano pode ser difícil de se estabelecer, visto que isso pode variar de acordo com características e peculiaridade de cada espécie.

Em relação à temperatura, as bactérias selecionadas para o desenvolvimento deveriam ser mesófilas, temperaturas ótimas de desenvolvimento entre 35°C e 39°C, podendo desenvolverem-se entre 15°C e 45°C (Madigan et al., 2015). Neste sentido, apesar das temperaturas médias da biblioteca estarem fora da faixa ótima de crescimento, a temperatura não deveria ser um impeditivo uma vez que se encontram dentro do intervalo de crescimento (16,8 °C – 26,7°C)

Outro fator poderia ser o tamanho das bactérias. Enquanto os fungos apresentam estruturas que variam de 1µm a 10µm, as bactérias comumente variam entre 0,1 µm e 5 µm (Wu et al. 2020). Os valores mais baixos do diâmetro das partículas podem dificultar a colheita destas partículas no ar.

Apesar disso, o equipamento utilizado descreve no seu manual a capacidade plena de realizar amostragens bacterianas. Assim, este não deveria ser um fator impeditivo para o desenvolvimento de bactérias.

O volume de ar utilizado durante a realização da amostragem poderia ser um fator limitante. Contudo, de acordo com as recomendações do fabricante deverá utilizar-se nestes espaços um volume de ar entre 200L e 500L, tendo-se utilizado no presente trabalho o volume mínimo recomendado (200L). Trabalhos realizados por Skóra et al. (2015) e Valeriani et al., (2017) utilizam volume menores, no entanto os ambientes estudados apresentavam valores de HR superiores.

Diante disto é difícil estabelecer explicações para a ausência do desenvolvimento bacteriano nestes locais. Uma das hipóteses mais plausíveis poderá estar relacionada com os valores baixos de HR observada nos espaços que provavelmente limitou a viabilidade bacteriana. Neste cenário sugere-se, no futuro, a utilização de volumes maiores para a aumentar o nível de detecção desses microrganismos.

4.6 Avaliação da correlação entre os parâmetros

Com o objetivo de avaliar as correlações existentes entre os parâmetros estudados, foi construída a matriz de correlação de Spearman (Tabela 29), tendo-se observado correlações significativas ($p < 0,05$) entre as variáveis analisadas.

Os parâmetros HR e temperatura apresentaram uma correlação significativa negativa (-0,557). Isso ocorre porque a HR avalia a quantidade de água presente no ar, sendo que essa capacidade de retenção de humidade é fortemente influenciada pela temperatura (Henderson, 2013). A HR é definida como a razão entre a pressão parcial de vapor de água presente na atmosfera e a pressão de vapor de saturação. Assim, conforme a temperatura aumenta, a pressão de vapor de saturação também se eleva (Legg, 2017), resultando na diminuição da HR.

Também a temperatura apresentou correlações significativas com o CO₂ e com o CH₂O. A presença de CO₂ no ambiente interior está diretamente relacionada à ocupação da biblioteca. Nesse contexto, a ocupação da biblioteca ocorre predominantemente durante o dia quando a UTA permanece ativa, promovendo o aquecimento dos espaços interiores. No que diz respeito à correlação entre temperatura e formaldeído (CH₂O) este é um composto orgânico volátil e, por isso, apresenta uma tendência natural à volatilização. Assim, à medida que a temperatura aumenta, observa-se um aumento da volatilização deste poluente (APA, 2010). Resultados semelhantes aos do presente trabalho foram também referidos por Godish e Rouch (1986) e Hwang et al. (2017). Além disso, a forte correlação entre o CH₂O e o CO₂ sugere que a presença de formaldeído pode estar associada à ocupação da biblioteca ou ao funcionamento do sistema de ventilação.

O monóxido de carbono é um poluente emitido a partir de processos de combustão de compostos carbonáceos (ABNT, 2013). Já o material particulado pode ser gerado por diversos processos naturais e antrópicos, entre os quais se destacam a combustão, seja por exaustão de

veículos, aquecimento de edifícios, entre outros (Tétreault, 2021). Assim, a correlação observada entre o CO e PM₁₀ e PM_{2,5} pode estar associada à combustão de materiais carbonáceos.

A correlação entre a concentração fúngica observada e os PM₁₀ e PM_{2,5} está relacionada com o tamanho dos esporos fúngicos presentes no ar. Os esporos de fungos podem variar entre 1 µm e 10 µm de diâmetro (Wu et al., 2020). Apesar disso, observa-se uma correlação mais forte entre a concentração fúngica e o PM_{2,5}, o que indica que a maioria dos esporos fúngicos observados pode ter apresentado diâmetro inferior a 2,5 µm ou estar associada a bioaerossóis com esse tamanho de partícula.

Por fim, a correlação observada entre PM₁₀ e PM_{2,5} é justificada pela definição dos dois parâmetros. A concentração de PM₁₀ é calculada a partir de partículas com até 10 µm de diâmetro, o que inclui, naturalmente, as partículas até 2,5 µm (PM_{2,5}).

Tabela 29 Matriz de correlação de Spearman

	HR (%)	Temperatura (°C)	CO (ppm)	TVOC (ppb)	CO ₂ (ppm)	CH ₂ O (ppb)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	Fungos (ufc/m ³)
HR (%)	-	p-valor = 0,009	p-valor = 0,390	p-valor = 0,881	p-valor = 0,106	p-valor = 0,658	p-valor = 0,633	p-valor = 0,927	p-valor = 0,929
Temperatura (°C)	-0,557**	-	p-valor = 0,546	p-valor = 0,489	p-valor = <0,001	p-valor = 0,038	p-valor = 0,701	p-valor = 0,009	p-valor = 0,676
CO (ppm)	-0,198	0,140	-	p-valor = 0,978	p-valor = 0,964	p-valor = 0,911	p-valor = 0,007	p-valor = 0,009	p-valor = 0,232
TVOC (ppb)	0,035	-0,160	-0,007	-	p-valor = 0,810	p-valor = 0,654	p-valor = 0,570	p-valor = 0,728	p-valor = 0,254
CO ₂ (ppm)	-0,364	0,736***	-0,010	-0,056	-	p-valor = <0,001	p-valor = 0,754	p-valor = 0,810	p-valor = 0,729
CH ₂ O (ppb)	-0,103	0,455*	-0,026	0,104	0,731***	-	p-valor = 0,365	p-valor = 0,792	p-valor = 0,670
PM _{2,5} (µg/m ³)	0,110	-0,089	0,573**	0,131	-0,073	-0,208	-	p-valor = <0,001	p-valor = 0,028
PM ₁₀ (µg/m ³)	-0,110	-0,021	0,553**	-0,081	0,056	-0,061	0,849***	-	p-valor = 0,006
Fungos (ufc/m ³)	0,021	-0,097	0,273	0,260	0,081	-0,099	0,480*	0,580**	-

* p-valor <0,05 ; ** p-valor <0,01 ; *** p-valor < 0,001

Considerações finais

A presente dissertação teve como objetivo caracterizar a Qualidade do Ar Interior (QAI) da biblioteca da Escola Superior Agrária (ESA) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), a partir da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, durante as estações de outono, inverno e primavera. A investigação procurou ainda identificar os fatores que influenciam a QAI e avaliar a conformidade dos dados observados com os limites estabelecidos pela legislação portuguesa.

Os resultados revelaram variações significativas nos parâmetros monitorizados, tanto em termos sazonais quanto espaciais. Os valores baixos de HR observados (23,5 a 39,4%) em todos os ambientes avaliados são preocupantes do ponto de vista da saúde dos ocupantes e também na

preservação do acervo. Valores de HR entre 30% e 40% podem provocar desconforto respiratório e aumentar a dispersão viral em ambientes fechados, enquanto valores abaixo de 30% podem causar irritação da mucosa ocular, nasal e da garganta, ressecamento da pele e das vias respiratórias. Quanto à preservação do acervo, HR inferiores a 40% estão associadas ao aumento da suscetibilidade a encolhimento, enrijecimento e formação de fissuras nos materiais, tornando-os mais frágeis e propensos à degradação.

As variações térmicas observadas entre os diferentes compartimentos da biblioteca estiveram relacionadas com o sistema de ventilação e com a exposição solar. Zonas não climatizadas (A4 e A8 no depósito de livros) apresentaram as temperaturas médias mais baixas (entre 17,8°C e 20,1°C), enquanto zonas com climatização suplementar (G5 e G7) registaram as mais elevadas (frequentemente superiores a 22°C). De um modo geral, as temperaturas observadas estiveram fora da faixa considerada ideal para o desempenho académico, isto é, acima de 22°C, e para a conservação de acervos (17°C a 22°C). O conforto térmico, avaliado pelo diagrama do INMET, classificou a maioria dos pontos como "muito secos", especialmente C3, e indicou a necessidade de exposição ao sol para conforto em A4 e A8.

No que diz respeito à conformidade legal, os poluentes físico-químicos (CO, CO₂, COVs, CH₂O, PM_{2,5} e PM₁₀) mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pela Portaria n.º 138-G/2021. Destaca-se os picos de COVs relacionados com o uso de álcool a 70% para desinfecção das cabeças do amostrador durante as medições microbiológicas, dado que o etanol é um COV.

O material particulado, PM_{2,5} e PM₁₀, exibiu comportamentos similares entre si, com concentrações médias maiores no outono e uma tendência de redução para a primavera. A dinâmica do PM pode estar relacionada à ocupação dos espaços, atividades desenvolvidas (como limpeza) e variações na ventilação. A razão I/E para o PM_{2,5} e PM₁₀ indicou que a sua origem é mista, com contribuições tanto internas quanto externas, dependendo da estação.

Quanto aos poluentes microbiológicos, a razão I/E indicou que os fungos observados no interior tiveram origem em fontes externas. Foram identificados 17 géneros distintos de fungos, com predominância de *Cladosporium*, *Penicillium* e *Aspergillus* nos períodos avaliados. A presença destes fungos é preocupante tanto para a saúde dos ocupantes como para a preservação do acervo (devido à biodegradação da celulose e associação com infestações de insetos). No que tange à conformidade legal, as concentrações de fungos no interior foram inferiores às do exterior e estiveram abaixo dos limites máximos estabelecidos pela Portaria n.º 138-G/2021. Ao contrário do reportado em outros estudos, não foi observado desenvolvimento bacteriano em nenhuma das campanhas realizadas, facto que pode estar relacionado com a baixa humidade relativa registada.

A análise de correlação de Spearman revelou associações significativas entre parâmetros, como por exemplo entre a temperatura e o CO₂, possivelmente devido ao funcionamento do sistema de climatização. A temperatura também mostrou correlação com a HR, o que era esperado devido à dependência da HR com a temperatura. O CO correlacionou-se com o PM_{2,5} e PM₁₀, sugerindo uma origem comum ligada a processos de combustão. Por fim, as concentrações fúngicas correlacionaram-se com o PM_{2,5} e PM₁₀, indicando que os esporos fúngicos podem ter diâmetros de partícula de até 2,5 µm ou estarem associados a bioaerossóis desse tamanho.

A partir dos resultados da caracterização da qualidade do ar da biblioteca notaram-se pontos críticos relacionados com a temperatura e humidade relativa, os quais representam riscos para a conservação do material e para o conforto dos ocupantes. Ademais, o funcionamento intermitente da UTA expõe a coleção da biblioteca à mais variações destes parâmetros, o que aumenta o risco e compromete a longevidade do acervo. Assim, esse problema decorre de dois aspetos centrais: a falta de controle sobre os parâmetros durante o dia e das oscilações ocasionadas pelos processos de ligação e desligamento da UTA.

Diante disso, duas sugestões podem ser realizadas para a melhoria do funcionamento do sistema. Em primeiro lugar, a necessidade de um sistema integrado de monitorização destes parâmetros e o modo de operação da UTA, o qual indique a necessidade de ajustes e altere o funcionamento do sistema a fim de manter a HR e a temperatura dentro das faixas adequadas (HR: 55% e 60% e temperatura: 18 °C e 24 °C). Neste sentido ainda, esse sistema poderia realizar acionamento da UTA no período noturno quando fosse observado a necessidade, para que não ocorresse oscilações bruscas. Em segundo lugar, a implementação de sistemas de humificadores na biblioteca mostra-se uma alternativa uma vez que a HR relativa se mantém constantemente abaixo dos limites de proteção da saúde dos ocupantes e de preservação do acervo.

Como sugestão para investigações futuras, propõe-se a realização de amostragens no período de verão e expansão dos pontos de amostragem. A monitorização durante o verão poderia complementar a análise, permitindo avaliar os impactos de procedimentos como limpezas profundas e observar as condições da biblioteca sob uma ocupação mínima. Além disso, a expansão dos pontos de amostragem permitiria uma caracterização mais completa da QAI. Uma segunda abordagem seria a aplicação de questionários direcionados aos ocupantes da biblioteca, com o objetivo de avaliar a percepção subjetiva da qualidade do ar e do conforto ambiental, complementando os dados objetivos com informações sobre o impacto direto dos parâmetros analisados na experiência dos utilizadores.

A presente investigação procurou apresentar e reforçar a importância da monitorização contínua da qualidade do ar interior como instrumento fundamental para a preservação de acervos documentais e a promoção da saúde e do bem-estar dos seus utilizadores. Ademais, buscou-se apresentar e recolher informações valiosas para a compreensão das dinâmicas interiores de parâmetros físico, químicos e microbiológicos em ambientes de bibliotecas, desta forma contribuindo para o aumento das discussões a QAI dentro da literatura científica, em especial lusófona.

Referencias bibliográficas

- Adcock, E. P. (1998). IFLA PRINCIPLES FOR THE CARE AND HANDLING OF LIBRARY MATERIAL. *Preservation*, 1(one).
- Agarwal, N., Meena, C. S., Raj, B. P., Saini, L., Kumar, A., Gopalakrishnan, N., Kumar, A., Balam, N. B., Alam, T., Kapoor, N. R., & Aggarwal, V. (2021). Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review. *Sustainable Cities and Society*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>
- APA. (2010). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores Um Guia Técnico*. https://webstorage.cienciaviva.pt/public/pt.cienciaviva.www/divulgacao/Manual_QAI_APA_Maio2010.pdf.
- APA. (2021). *Partículas em suspensão (PM) | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/particulas-em-suspensao-pm>
- Almaie, S., Vatanpour, V., Rasoulifard, M. H., & Koyuncu, I. (2022). Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review. In *Chemosphere* (Vol. 306). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135655>
- Amante, M. J. (2010). *Bibliotecas universitárias: Conhecer para valorizar*. Congresso Nacional de Bibliotecários Arquivistas e Documentalistas, 10, Guimarães.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2019) *ASHREA Handbook – HVAC application (SI)*. ASHREA
- Arbex, M. A., Santos, U. de P., Martins, L. C., Saldiva, P. H. N., Pereira, L. A. A., & Braga, A. L. F. (2012). A poluição do ar e o sistema respiratório. In *Jornal Brasileiro de Pneumologia* (Vol. 38, Issue 5). <https://doi.org/10.1590/S1806-37132012000500015>
- Aziz, N., Adman, M. A., Suhaimi, N. S., Misbari, S., Alias, A. R., Aziz, A. A., Lee, L. F., & Khan, M. M. H. (2023). Indoor Air Quality (IAQ) and Related Risk Factors for Sick Building Syndrome (SBS) at the Office and Home: A Systematic Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1140(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1140/1/012007>
- Bensch, K., Braun, U., Groenewald, J. Z., & Crous, P. W. (2012). The genus *cladosporium*. *Studies in Mycology*, 72. <https://doi.org/10.3114/sim0003>
- Bezerra, G. F. D. B., Silva, M. A. C. N. D., Santos, R. M. D., Haidar, D. M. C., Muniz Filho, W. E., Rosa, I. G., ... & Nascimento, M. D. D. S. B. (2014). Avaliação da resposta IgE para o entendimento do papel de fungos do ar na alergia respiratória em crianças. *Braz. j. allergy imunol*, 119-124.
- Bosco, F., Demichela, M., Barresi, A. A., & Fissore, D. (2020). Microbial contamination of libraries and archives: risk assessment and contamination control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 949(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/949/1/012030>
- Building ventilation: theory and measurement. (1997). *Choice Reviews Online*, 35(04). <https://doi.org/10.5860/choice.35-2135>
- Camuffo, D. (2019). *Microclimate for Cultural Heritage: Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*, Third Edition. In *Microclimate for Cultural Heritage: Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02191-2>
- Camuffo, D. (1998). *Microclimate for Cultural Heritage*. Elsevier, Amsterdam.
- Cândido, C., Durakovic, I., & Marzban, S. (Eds.). (2024). *Routledge Handbook of High-performance Workplaces*. Taylor & Francis.
- Cappitelli, F., Fermo, P., Vecchi, R., Piazzalunga, A., Valli, G., Zanardini, E., & Sorlini, C. (2009). Chemical–physical and microbiological measurements for indoor air quality assessment at the Ca’Granda Historical Archive, Milan (Italy). *Water, Air, and Soil Pollution*, 201, 109-120.
- Carrer, P., & Wolkoff, P. (2018). Assessment of indoor air quality problems in office-like environments: Role of occupational health services. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/ijerph15040741>

-
- Čeliković, I., Pantelić, G., Vukanac, I., Nikolić, J. K., Živanović, M., Cinelli, G., Gruber, V., Baumann, S., Poncela, L. S. Q., & Rabago, D. (2022). Outdoor Radon as a Tool to Estimate Radon Priority Areas— A Literature Overview. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/ijerph19020662>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2022). Formaldeído [PDF]. CETESB.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2018). Padrões de qualidade do ar (Resolução nº 491/2018). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, 223.
- da Conceição Pereira, P. F., Broday, E. E., de Paula Xavier, A. A., & da Silva Simões, A. (2020). Evaluation of the Thermal Environment Influence on Cognitive Performance in Students in Northeast Brazil. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 277). https://doi.org/10.1007/978-3-030-41486-3_56
- da Silva, J. C., Fernandes, O. C. C., Da, M., Martins, S., Da, A., Rodrigues, C., & Teixeira, M. F. S. (2010). Artigo original Atividade antimicrobiana de espécies de *Penicillium* mantidas sob duas condições de preservação. In *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología* (Vol. 30).
- David, E., & Niculescu, V. C. (2021). Volatile organic compounds (Vocs) as environmental pollutants: Occurrence and mitigation using nanomaterials. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 18, Issue 24). <https://doi.org/10.3390/ijerph182413147>
- Degu Belete, G., & Alemu Anteneh, Y. (2021). General Overview of Radon Studies in Health Hazard Perspectives. In *Journal of Oncology* (Vol. 2021). <https://doi.org/10.1155/2021/6659795>
- Drougka, F., Liakakou, E., Sakka, A., Mitsos, D., Zacharias, N., Mihalopoulos, N., & Gerasopoulos, E. (2020). Indoor air quality assessment at the library of the national observatory of Athens, Greece. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(4). <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.07.0360>
- Fantuzzi, G., Aggazzotti, G., Righi, E., Cavazzuti, L., Predieri, G., & Franceschelli, A. (1996). Indoor air quality in the university libraries of Modena (Italy). *Science of the Total Environment*, 193(1). [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05335-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05335-1)
- Fernandes, C., Casadevall, A., & Gonçalves, T. (2023). Mechanisms of *Alternaria* pathogenesis in animals and plants. In *FEMS Microbiology Reviews* (Vol. 47, Issue 6). <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad061>
- Ferreira, A. M. C., & Cardoso, S. M. (2013). Estudo exploratorio da qualidade do ar em escolas de educacao basica, Coimbra, Portugal. *Revista de Saúde Pública*, 47(6). <https://doi.org/10.1590/s0034-8910.2013047004810>
- Ferreira, M. C. C. (2012). Consumo doméstico de biomassa lenhosa e emissões atmosféricas na cidade de Bragança (Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal)).
- Ferreira, M., & Coelho, M. J. P. (2006). O radão nos edifícios: minimização da perigosidade. *A Obra Nasce*, 3, 70.
- Flieder, F., & Duchein, M. (1993). Livros e documentos de arquivo: preservação e conservação.
- Gibson, L. T., Ewlad-Ahmed, A., Knight, B., Horie, V., Mitchell, G., & Robertson, C. J. (2012). Measurement of volatile organic compounds emitted in libraries and archives: An inferential indicator of paper decay? *Chemistry Central Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-42>
- Godish, T., & Rouch, J. (1986). Mitigation of Residential Formaldehyde Contamination by Indoor Climate Control. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(12). <https://doi.org/10.1080/15298668691390674>
- Göksay Kadayıfçılar, D. (2017). Indoor Air Quality of the Library at İstanbul University, Turkey. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 1(45). <https://doi.org/10.15671/hjbc.2017.140>
- Guarnieri, G., Olivieri, B., Senna, G., & Vianello, A. (2023). Relative Humidity and Its Impact on the Immune System and Infections. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/ijms24119456>
- Guerrero, C.A.A., Marulanda, C.J.N. & Díaz, C.J.G. (2022). *Fusarium* spp. infection: The importance of an early diagnosis. *Enfermedades infecciosas y microbiología clinica* (English ed.), 40(6), 339-341.

-
- Güneş, G., Yalçın, N., & Çolaklar, H. (2022). Investigation of indoor air quality in university libraries in terms of gaseous and particulate pollutants in Bartın, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09818-8>
- Gupta, P., Samant, K., & Sahu, A. (2012). Isolation of cellulose-degrading bacteria and determination of their cellulolytic potential. *International Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.1155/2012/578925>
- Gutarowska, B. (2013). Niszczanie materiałów technicznych przez drobnoustroje. *LAB Laboratoria, Aparatura, Badania*, 18, 10-14.
- Hassan, A., Zeeshan, M., & Bhatti, M. F. (2021). Indoor and outdoor microbiological air quality in naturally and mechanically ventilated university libraries. *Atmospheric Pollution Research*, 12(8). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101136>
- Hayleeyesus, S. F., & Manaye, A. M. (2014). Microbiological quality of indoor air in University libraries. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 4. <https://doi.org/10.12980/APJTB.4.2014C807>
- Health risks of indoor exposure to fine particulate matter and practical mitigation solutions. (2024). In *Health Risks of Indoor Exposure to Fine Particulate Matter and Practical Mitigation Solutions*. <https://doi.org/10.17226/27341>
- Henderson, J. (2002). Managing the library and archive environment. Preservation Advisory Centre.
- Heritage Collections Council, Brown, S., Cole, I., Daniel, V., King, S., & Pearson, C. (2002). Guidelines for environmental control in cultural institutions. In Heritage Collections Council.
- Herrmann, D. C. (2001). Understanding CO₂ and ASHRAE 62 A Technical Note. *Energy Engineering*, 99(1). <https://doi.org/10.1092/539q-agnn-86aa-e22h>
- Hof, H. (2019). *Rhodotorula* spp. in the gut - foe or friend? *GMS Infectious Diseases*, 7. <https://doi.org/10.3205/id000042>
- Hof, H. (2020). The medical relevance of *Fusarium* spp. *Journal of fungi*, 6(3), 117.
- Hwang, S. H., Lee, G. B., Kim, I. S., & Park, W. M. (2017). Formaldehyde and carbon dioxide air concentrations and their relationship with indoor environmental factors in daycare centers. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(3). <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1231145>
- Iliopoulou, S., Kourteli, M., Damialis, A., Kapsanaki-Gotsi, E., & Pyrri, I. (2024). Air mycobiome in the National Library of Greece following relocation to novel premises. *Heliyon*, 10(16).
- Jain, S., Goel, A., Ola, D., Addya, A., & Kabdal, Y. (2025). Assessing the impact of high and low occupancy on air quality inside a library. *Sādhanā*, 50(2).
- Jiang, J., Ding, X., Isaacson, K. P., Tasoglou, A., Huber, H., Shah, A. D., Jung, N., & Boor, B. E. (2021). Ethanol-based disinfectant sprays drive rapid changes in the chemical composition of indoor air in residential buildings. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100042>
- Jones, E. R., Cedeño Laurent, J. G., Young, A. S., Coull, B. A., Spengler, J. D., & Allen, J. G. (2022). Indoor humidity levels and associations with reported symptoms in office buildings. *Indoor Air*, 32(1). <https://doi.org/10.1111/ina.12961>
- Kim, J., Kim, S., Lee, K., Yoon, D., Lee, J., & Ju, D. Y. (2013). Indoor aldehydes concentration and emission rate of formaldehyde in libraries and private reading rooms. *Atmospheric Environment*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.059>
- Klauss, A. K., Tull, R. H., Roots, L. M., & Pfafflin, J. R. (2011). History of the changing concepts in ventilation requirements. *ASHRAE Journal*, 53(2).
- Lazović, I. M., Stevanović, Ž. M., Jovašević-Stojanović, M. V., Živković, M. M., & Banjac, M. J. (2016). Impact of CO₂ concentration on indoor air quality and correlation with relative humidity and indoor air temperature in school buildings in Serbia. *Thermal Science*, 20(suppl. 1), 297-307.

-
- Legg, R. (2017). Air conditioning system design. Butterworth-Heinemann.
- Lee, H. W., Jeon, J. I., Lim, H. B., Lee, K. B., Park, S. Y., & Lee, C. M. (2021). A preliminary research study for distribution characteristics and sources of indoor air pollutants in the valuable archive of the national library of Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph18041715>
- Li, H., Qin, Y., & Feng, G. (2017). The analysis of PM_{2.5} outdoor fine particulate matter impact on air quality in the university libraries reading room in winter of North China. *Procedia Engineering*, 205.
- Li, S. (2023). Review of engineering controls for indoor air quality: a systems design perspective. *Sustainability*, 15(19).
- Lin, K., & Marr, L. C. (2020). Humidity-Dependent Decay of Viruses, but Not Bacteria, in Aerosols and Droplets Follows Disinfection Kinetics. *Environmental Science and Technology*, 54(2). <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04959>
- Lucas, R. E. C., da Silva, L. B., de Souza, E. L., Leite, W. K. dos S., & da Silva, J. M. N. (2024). Influence of environmental variables on students' cognitive performance in indoor higher education environments. *Work*, 79(1). <https://doi.org/10.3233/WOR-220055>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Dunlap, P. v., & Clark, D. P. (2015). Brock. *Biologia de los microorganismos 14ED. Biologia de Los Microorganismos*, 1.
- Marques, G., Ferreira, C. R., & Pitarma, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment Using a CO₂ Monitoring System Based on Internet of Things. *Journal of Medical Systems*, 43(3). <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1184-x>
- Mašková, L., Smolík, J., & Vodička, P. (2015). Characterisation of particulate matter in different types of archives. *Atmospheric Environment*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.049>
- Menezes, C. P., Perez, A. L. A. de L., & Oliveira, E. L. (2017). *Cladosporium* spp: Morfologia, infecções e espécies patogênicas. *Acta Brasiliensis*, 1(1). <https://doi.org/10.22571/actabra1120176>
- Miguel, A. (2014). *Manual de Higiene e Segurança do Trabalho*. 13a Edição.
- Mottin, T. S. (2009). *Tóxicos que interferem no transporte de oxigênio pela hemoglobina*; Porto Alegre, 2009.
- Mousavi, B., Hedayati, M. T., Hedayati, N., Ilkit, M., & Syedmousavi, S. (2016). Aspergillus species in indoor environments and their possible occupational and public health hazards. *Current Medical Mycology*, 2(1). <https://doi.org/10.18869/acadpub.cmm.2.1.36>
- Nguyen, T. T. T., Kim, J., Jeon, S. J., Lee, C. W., Magan, N., & Lee, H. B. (2018). Mycotoxin production of *Alternaria* strains isolated from Korean barley grains determined by LC-MS/MS. *International Journal of Food Microbiology*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.01.003>
- Nunes, M. S. C., & de Carvalho, K. (2016). As bibliotecas universitárias em perspectiva histórica: A caminho do desenvolvimento durável. *Perspectivas Em Ciencia Da Informacao*, 21(1). <https://doi.org/10.1590/1981-5344/2572>
- Persily, A. (2015). Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. In *Building and Environment* (Vol. 91). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.026>
- Persily, A. (2020). Development of an Indoor Carbon Dioxide Metric. AIVC Co, 3.
- Persily, A. (2022). Development and application of an indoor carbon dioxide metric. *Indoor Air*, 32(7). <https://doi.org/10.1111/ina.13059>
- Persily, A., & Polidoro, B. (2020). Development and application of an indoor carbon dioxide metric. 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate: Creative and Smart Solutions for Better Built Environments, Indoor Air 2020.
- Prockop, L. D., & Chichkova, R. I. (2007). Carbon monoxide intoxication: An updated review. *Journal of the Neurological Sciences*, 262(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jns.2007.06.037>
- Pyrri, I., Tripyla, E., Zalachori, A., Chrysopoulou, M., Parmakelis, A., & Kapsanaki-Gotsi, E. (2020). Fungal contaminants of indoor air in the National Library of Greece. *Aerobiologia*, 36(3). <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09640-0>

-
- Real, L., Viegas, J., Patrício, J., Pereira, A., Costa, J., & Linares, P. (2024). Soluções para prevenção e mitigação do radão em edifícios.
- Pinto, V. E. F., & Patriarca, A. (2016). *Alternaria* species and their associated mycotoxins. *Mycotoxigenic fungi: Methods and protocols*, 13-32.
- Ryhl-Svendson, Morten. (2007). The role of air exchange rate and surface reaction rates on the air quality in museum storage buildings. *Museum Microclimates*.
- Sadrizadeh, S., Yao, R., Yuan, F., Awbi, H., Bahnfleth, W., Bi, Y., Cao, G., Croitoru, C., de Dear, R., Haghighat, F., Kumar, P., Malayeri, M., Nasiri, F., Ruud, M., Sadeghian, P., Wargocki, P., Xiong, J., Yu, W., & Li, B. (2022). Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the indoor environment. *Chemical Reviews*, 110(4). <https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- Schwarz, W. H. (2001). The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 56, Issues 5–6). <https://doi.org/10.1007/s002530100710>
- Skóra, J., Gutarowska, B., Pielech-Przybylska, K., Stępień, Ł., Pietrzak, K., Piotrowska, M., & Pietrowski, P. (2015). Assessment of microbiological contamination in the work environments of museums, archives and libraries. *Aerobiologia*, 31(3). <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9372-8>
- Souza, G. A. (2023). Avaliação experimental do conforto térmico de uma biblioteca. *Revista Faculdades do Saber*, 8(19), 1998-2007.
- Sun, Y., Hou, J., Cheng, R., Sheng, Y., Zhang, X., & Sundell, J. (2019). Indoor air quality, ventilation and their associations with sick building syndrome in Chinese homes. *Energy and Buildings*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.046>
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily, A. K., Pickering, A. C., Samet, J. M., Spengler, J. D., Taylor, S. T., & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air*, 21(3). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x>
- Tang, J. W. (2009). The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. In *Journal of the Royal Society Interface* (Vol. 6, Issue SUPPL. 6). <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0227.focus>
- Thickett, D., Rhee, S. J., & Lambarth, S. (2007). Libraries and archives in historic buildings. *Museum Microclimates*, 145-155.
- Thomma, B. P. H. J. (2003). *Alternaria* spp.: From general saprophyte to specific parasite. In *Molecular Plant Pathology* (Vol. 4, Issue 4). <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2003.00173.x>
- Ting, D. S. (2010). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. *International Journal of Environmental Studies*, 67(1). <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>
- Townsend, C. L., & Maynard, R. L. (2002). Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occupational and Environmental Medicine*, 59(10). <https://doi.org/10.1136/oem.59.10.708>
- Trinkley, M. (2001). Considerações sobre preservação na construção e reforma de bibliotecas: planejamento para preservação. In *Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos* (Vol. 2, Issue Artigo 38).
- Urgellés, C., & Crehuet, A. (2001). El patrimonio bibliográfico y documental: claves para su conservación preventiva.
- Uhde, E., & Salthammer, T. (2007). Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality-A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmospheric Environment*, 41(15). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.082>
- US EPA. (2024). *Care for Your Air: A Guide to Indoor Air Quality*. US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/care-your-air-guide-indoor-air-quality>

-
- US EPA. (2025a). *Carbon Monoxide's Impact on Indoor Air Quality* | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>
- US EPA. (2025). *Introduction to Indoor Air Quality* | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
- US EPA. (2025b). *The Indoor Microbiome*. US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-microbiome>
- Valeriani, F., Cianfanelli, C., Gianfranceschi, G., Santucci, S., Romano Spica, V., & Mucci, N. (2017). Monitoring biodiversity in libraries: A pilot study and perspectives for indoor air quality. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, 58(3).
- Vibert, C., Fayolle, B., Ricard, D., & Dupont, A. L. (2023). Decoupling hydrolysis and oxidation of cellulose in permanent paper aged under atmospheric conditions. *Carbohydrate Polymers*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120727>
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
- WHO/Europe. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. Bonn, Germany: In Puncto Druck+ Medien GmbH. <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>
- Wirth, F., & Goldani, L. Z. (2012). Epidemiology of rhodotorula: An emerging pathogen. In *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases* (Vol. 2012). <https://doi.org/10.1155/2012/465717>
- Wolkoff, P. (2013). Indoor air pollutants in office environments: Assessment of comfort, health, and performance. In *International Journal of Hygiene and Environmental Health* (Vol. 216, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.08.001>
- World Health Organization. (2021). Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. In World Health Organization.
- WHO. (2024). *Air Pollution*. World Health Organization; World Health Organization. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Wu, D., Zhang, Y., Tian, Y., Li, A., Li, Y., Xiong, J., & Gao, R. (2020). On-site investigation of the concentration and size distribution characteristics of airborne fungi in a university library. *Environmental Pollution*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114138>
- Wu, Y., Lu, Y., & Chou, D. C. (2018). Indoor air quality investigation of a university library based on field measurement and questionnaire survey. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2). <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty007>
- Yang, Z. (2017). Indoor air pollution and preventions in college libraries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012076>

Anexo A Questionário de caracterização das condições no momento da amostragem

Qualidade do Ar Interior na Biblioteca da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança

Questionário de condições de medição

Data da medição:

1. Informações gerais	
Local da medição:	
Área do compartimento (m ²):	
Nº de pessoas na biblioteca:	
Nº de pessoas no compartimento:	

2. Inspeção visual do edifício			
	Sim	Não	Comentário
Crescimento visível de fungos?			
Presença de manchas de humidade nas paredes?			
Presença de manchas de humidade no teto?			
Condensação nas janelas?			
Presença de fendas estruturais?			

3. Condições de medição			
	Sim	Não	Comentário
Ocorreu a abertura das janelas durante o período de medição?			
Ocorreu limpeza durante o período de medição?			
Foi observado a presença de algum odor desagradável?			
Foi observado a presença de algum odor agradável?			

4. Condições de medição		
Horário	Nº de ocupantes	Comentário

Anexo B Tabela de conversão para o número mais provável de colónias

55mm contact plates - 90mm Petri Plates - 219 holes 1,00 mm											
r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr	r	Pr
1	1	38	42	75	92	112	156	149	249	186	412
2	2	39	43	76	93	113	158	150	252	187	418
3	3	40	44	77	95	114	160	151	255	188	425
4	4	41	45	78	96	115	162	152	258	189	432
5	5	42	46	79	98	116	165	153	261	190	439
6	6	43	48	80	99	117	167	154	265	191	447
7	7	44	49	81	101	118	169	155	268	192	455
8	8	45	50	82	102	119	171	156	271	193	463
9	9	46	51	83	104	120	173	157	275	194	471
10	10	47	53	84	106	121	176	158	278	195	480
11	11	48	54	85	107	122	178	159	282	196	489
12	12	49	55	86	109	123	180	160	286	197	499
13	13	50	57	87	110	124	182	161	289	198	508
14	14	51	58	88	112	125	185	162	293	199	519
15	15	52	59	89	114	126	187	163	297	200	530
16	17	53	60	90	116	127	189	164	301	201	542
17	18	54	62	91	117	128	192	165	305	202	554
18	19	55	63	92	119	129	194	166	309	203	567
19	20	56	64	93	121	130	196	167	313	204	580
20	21	57	66	94	122	131	199	168	317	205	595
21	22	58	67	95	124	132	201	169	322	206	611
22	23	59	69	96	126	133	204	170	326	207	627
23	24	60	70	97	128	134	206	171	331	208	646
24	25	61	71	98	130	135	209	172	335	209	666
25	26	62	73	99	131	136	212	173	340	210	687
26	28	63	74	100	133	137	214	174	344	211	712
27	29	64	76	101	135	138	217	175	349	212	739
28	30	65	77	102	137	139	220	176	354	213	770
29	31	66	78	103	139	140	222	177	359	214	807
30	32	67	80	104	141	141	225	178	365	215	851
31	33	68	81	105	142	142	228	179	370	216	905
32	34	69	83	106	144	143	231	180	375	217	978
33	36	70	84	107	146	144	234	181	381	218	1088
34	37	71	86	108	148	145	237	182	387	219	1307
35	38	72	87	109	150	146	240	183	393		
36	39	73	88	110	152	147	243	184	399		
37	40	74	90	111	154	148	246	185	405		

Anexo C Resultado do teste de DCSF para os parâmetros monitorizados

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem - Temperatura							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	<0,001	<0,001	-				
C2	<0,001	<0,001	0,405	-			
C3	<0,001	<0,001	0,003	0,156	-		
G5	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,761	-	
G7	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,856	0,999	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano - Temperatura			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	0,090	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem - Humidade Relativa							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	<0,001	<0,001	-				
C2	<0,001	<0,001	0,303	-			
C3	<0,001	<0,001	0,016	0,806	-		
G5	<0,001	<0,001	0,984	0,994	0,108	-	
G7	<0,001	<0,001	0,199	0,984	0,997	0,510	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano - Humidade Relativa			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	0,010	-	
Primavera	<0,001	0,011	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem - CO							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	0,104	<0,001	-				
C2	0,867	<0,001	0,503	-			
C3	0,510	0,224	0,015	0,144	-		
G5	<0,001	0,999	<0,001	<0,001	0,262	-	
G7	0,113	0,356	0,004	0,007	0,998	0,436	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano - CO			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	0,008	-	
Primavera	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem - CO ₂							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	0,009	-					
C1	<0,001	<0,001	-				
C2	<0,001	<0,001	0,997	-			
C3	<0,001	<0,001	0,971	1,000	-		
G5	<0,001	<0,001	0,063	0,002	<0,001	-	
G7	<0,001	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	0,987	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano - CO ₂			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – COVs							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	0,552	0,023	-				
C2	<0,001	0,002	<0,001	-			
C3	0,792	1,000	0,379	0,028	-		
G5	<0,001	0,290	0,002	0,178	0,952	-	
G7	0,254	0,704	0,734	0,003	0,877	0,020	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – COVs			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – CH ₂ O							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	<0,001	<0,001	-				
C2	<0,001	0,088	0,879	-			
C3	0,002	1,000	0,463	0,958	-		
G5	<0,001	0,034	0,974	0,683	0,181	-	
G7	<0,001	0,006	0,990	0,630	0,253	1,000	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – CH ₂ O			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	0,268	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – PM _{2,5}							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	<0,001	0,035	-				
C2	0,032	<0,001	0,125	-			
C3	<0,001	<0,001	0,979	0,223	-		
G5	0,361	<0,001	0,102	0,999	0,223	-	
G7	<0,001	0,997	<0,004	<0,001	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – PM _{2,5}			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – PM ₁₀							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	<0,001	-					
C1	<0,001	<0,001	-				
C2	0,064	<0,001	0,590	-			
C3	<0,001	<0,001	1,000	0,003	-		
G5	0,944	<0,001	0,064	0,681	0,003	-	
G7	<0,001	1,000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – PM ₁₀			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	<0,001	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – Fungos (manhã)							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	1,000	-					
C1	1,000	1,000	-				
C2	1,000	1,000	1,000	-			
C3	1,000	1,000	1,000	1,000	-		
G5	1,000	1,000	0,987	0,963	1,000	-	
G7	1,000	1,000	0,994	1,000	1,000	1,000	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – Fungos (manhã)			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	<0,001	-	
Primavera	<0,001	0,007	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre pontos de amostragem – Fungos (tarde)							
	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
A4	-						
A8	0,942	-					
C1	0,943	0,310	-				
C2	0,953	0,428	1,000	-			
C3	1,000	0,902	0,969	0,974	-		
G5	0,255	0,008	0,850	0,980	0,304	-	
G7	0,328	0,015	0,822	0,923	1,000	1,000	-

Teste de DCSF: Comparações múltiplas entre estações do ano – Fungos (tarde)			
	Outono	Inverno	Primavera
Outono	-		
Inverno	0,013	-	
Primavera	0,002	1,000	-

Anexo D Resultados do sequenciamento de fungos e código de acesso na plataforma BLAST.

Espécie	E-value	Identidade (%)	Código de acesso
<i>Debaryomyces</i> sp.	0,0	99.34%	MK394104.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	KF465776.1
<i>Debaryomyces</i> sp.	0,0	100%	NR_077067.1
<i>Clarireedia</i> sp.	0,0	98.78%	NR_157488.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	JF772180.1
<i>Trichoderma</i> sp.	0,0	99.81%	NR_165872.1
<i>Botrytis</i> sp.	0,0	100%	NR_159600.1
<i>Beauveria</i> sp.	0,0	100%	NR_111598.1
<i>Cladosporium</i> sp.	0,0	100%	OQ186119.1
<i>Aureobasidium</i> sp.	0,0	100%	JN712492.1
<i>Botrytis</i> sp.	0,0	100%	KX301016.1
<i>Filobasidium magnum</i>	0,0	100%	NR_130655.1
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	0,0	100%	KY104874.1
<i>Rhizopus</i> sp.	0,0	99.82	DQ641279.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	NR_138315.1
<i>Fusicolla septimanifiniscientiae</i>	0,0	100%	MK069422.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	MT558929.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	AF033465.1
<i>Boeremia</i> sp.	0,0	100%	OR346922.1
<i>Penicillium</i> sp.	0,0	100%	JN617660.1
<i>Cladosporium</i> sp.	0,0	99.79%	OQ186119.1
<i>Aspergillus</i> sp.	0,0	100%	OL772712.1
<i>Talaromyces</i> sp.	0,0	98.50%	NR_172039.1
<i>Alternaria eureka</i>	0,0	98,36%	MH861937.1

Anexo E Contagem total de gêneros fúngicos (UFC/m³) por pontos de amostragem coletados pela manhã

Estação do ano	Gênero	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
Outono	<i>Epicoccum</i> sp.	1,23						
	<i>Debaryomyces</i> sp							
	<i>Penicillium</i> sp	27,68	14,04	45,67	25,45	38,44	44,94	45,67
	<i>Beauveria</i> sp							
	<i>Botrytis</i> sp		0,41	9,51	10,21	10,48	4,49	4,42
	<i>Rhizopus</i> sp							
	<i>Trichoderma</i> sp							
	<i>Cladosporium</i> sp	46,75	31,8	58,04	51,99	51,25	43,82	29,46
	<i>Filobasidium</i> sp							
	<i>Talaromyces</i> sp							
	<i>Aureobasidium</i> sp							
	<i>Rhodotorula</i> sp							
	<i>Fusicolla</i> sp	0,62			2,79	2,33		
	<i>Boeremia</i> sp							
	<i>Aspergillus</i> sp							
	<i>Alternaria</i> sp		0,41	0,95		1,16		1,47
	<i>Clarireedia</i> sp							
Não identificada	1,23			12,07	4,66	6,74	1,47	
Inverno	<i>Epicoccum</i> sp			0,29				0,53
	<i>Debaryomyces</i> sp							
	<i>Penicillium</i> sp	21,88	27,45	4,04	5,25	4,2	36,22	4,09
	<i>Beauveria</i> sp							
	<i>Botrytis</i> sp							
	<i>Rhizopus</i> sp							
	<i>Trichoderma</i> sp	18,52	8,13	1,44	0,6	0,3	28,98	1,78
	<i>Cladosporium</i> sp	60,6	40,67	3,9	5,4	3,75	65,2	7,11
	<i>Filobasidium</i> sp							
	<i>Talaromyces</i> sp					1,65	3,62	
	<i>Aureobasidium</i> sp							
	<i>Rhodotorula</i> sp			0,87	0,6		12,68	0,53
	<i>Fusicolla</i> sp							
	<i>Boeremia</i> sp							0,71
	<i>Aspergillus</i> sp	43,77	14,23	2,17	1,5	2,7	18,11	
	<i>Alternaria</i> sp	23,57	11,18	1,73	1,65	2,4	16,3	0,71
	<i>Clarireedia</i> sp							
Não identificada							2,31	

Primavera

Epicoccum sp					0,27		
Debaryomyces sp			0,42		0,36		
Penicillium sp	2,22	0,93	2,53	2,6	2,04	1,4	1,8
Beauveria sp				0,29		0,2	
Botrytis sp			2,53	0,87	0,71	0,67	1,27
Rhizopus sp							
Trichoderma sp	0,7	1,17	1,48	0,72	0,18	0,33	
Cladosporium sp	3,38	1,63	3,17	2,89	1,78	1	2,53
Filobasidium sp							
Talaromyces sp	0,47			0,29			0,63
Aureobasidium sp	0,93				0,27	0,47	
Rhodotorula sp			0,21				
Fusicolla sp			0,63	0,58		0,2	
Boeremia sp			1,9	0,43			0,74
Aspergillus sp	0,93	1,56	5,49	3,32	2,4	1,93	2,43
Alternaria sp	1,63	0,7	0,63	0,72	0,89	0,27	0,53
Clariireedia sp	1,4	1,79	2,11	1,01		0,2	
Não identificado				0,72			0,63

Anexo F Contagem total de UFC de gêneros fúngicos por pontos de amostragem coletados pela tarde

Estação do ano	Gênero	A4	A8	C1	C2	C3	G5	G7
Outono	<i>Epicoccum</i>					0,55		0,62
	Debaryomyces							
	Penicillium	7,53	4,32	5,25	5,62	3,30	6,13	5,62
	Beauveria			0,30	1,04			
	Botrytis			0,45				
	Rhizopus							
	<i>Trichoderma</i>							
	<i>Cladosporium</i>	4,90	3,62	3,90	7,50	6,60	5,08	6,67
	Filobasidium							
	Talaromyces			0,45	0,42			
	Aureobasidium							
	Rhodotorula							
	Fusicolla sp		0,35		0,62			
	Boeremia sp		0,35					
	Aspergillus sp	4,03	3,03	4,65	5,00	4,77	5,95	5,42
	Alternaria sp	1,05			0,62			
	Clairreedia sp					3,12		0,83
	Não identificada						0,35	1,67
Inverno	<i>Epicoccum</i> sp				0,20		0,90	
	Debaryomyces sp							0,32
	Penicillium sp	2,06	1,50	5,67	3,40	2,30	2,70	4,03
	Beauveria sp							
	Botrytis sp			1,70		0,60		
	Rhizopus sp							
	Trichoderma sp							
	<i>Cladosporium</i> sp	0,89	1,45	4,34	2,10	2,70	5,25	6,12
	Filobasidium sp	0,17						
	Talaromyces sp				0,40			
	Aureobasidium sp			1,89				
	Rhodotorula sp							
	Fusicolla sp							
	Boeremia sp	1,17	0,72					0,48
	Aspergillus sp	1,11	1,45	2,83	2,80	3,10	4,05	3,71
	Alternaria sp	0,17		2,46	0,30			
	Clairreedia sp					1,10	1,05	0,81
	Não identificada		0,44			0,20	1,05	0,64

Primavera

Epicoccum sp	0,20			0,49			0,37
Debaryomyces sp							
Penicillium sp	2,30	2,08	4,25	5,62	3,47	4,31	4,40
Beauveria sp							
Botrytis sp							
Rhizopus sp							
Trichoderma sp							
Cladosporium sp	1,50	1,22	2,55	3,54	1,87	4,72	3,54
Filobasidium sp			0,47				
Talaromyces sp	0,80						
Aureobasidium sp							
Rhodotorula sp			0,28				0,24
Fusicolla sp							
Boeremia sp						1,25	0,37
Aspergillus sp	3,50	2,20	0,94	0,98		1,39	1,10
Alternaria sp	1,50	0,61	0,66	0,61	0,93	0,97	0,73
Clariireedia sp				0,98	0,40		
Não identificada	0,20		0,28			1,25	1,47