

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

TATIANE TAGINO COMIN

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR EM INTERIORES
E AMBIENTES ABERTOS DE UMA UNIVERSIDADE EM
SÃO CARLOS - SP**

SÃO CARLOS

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

TATIANE TAGINO COMIN

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR EM INTERIORES
E AMBIENTES ABERTOS DE UMA UNIVERSIDADE EM
SÃO CARLOS - SP

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

Orientação: Prof.^a Dr.^a Mônica Lopes Aguiar

SÃO CARLOS

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C733a Comin, Tatiane Tagino
Avaliação da qualidade do ar em interiores e ambientes abertos de uma universidade em São Carlos - SP / Tatiane Tagino Comin. -- São Carlos : UFSCar, 2016.
123 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Monitoramento ambiental. 2. Qualidade do ar.
3. Salas de aula. I. Título.

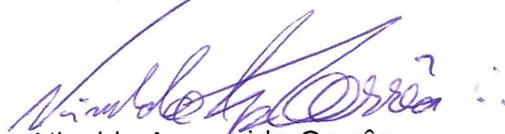
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE TATIANE TAGINO COMIN APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 26 DE FEVEREIRO DE 2016.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Adriana Gioda
PUC


Meuris Gurgel Carlos da Silva
UNICAMP


Nivaldo Aparecido Corrêa
USP


Simone Andréa Pozza
UNICAMP

*Aos meus amados pais,
pelo apoio, amor e paciência sempre incondicionais.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço eternamente aos meus pais, Maria Aparecida Tagino Comin e Luiz Eduardo Comin, por sempre acreditarem no meu potencial e me incentivarem em todas as difíceis decisões acadêmicas. Obrigada por terem contribuído em todas as minhas conquistas e por serem minhas maiores inspirações de vida.

Ao meu irmão Eduardo, o Engenheiro Ambiental e Sanitarista da família, que, além de todo apoio, foi meu estagiário e ajudou na preparação das coletas de dados e discussão de resultados.

À minha avó Tereza que sempre torceu e “rezou” muito pelo meu sucesso e aos meus falecidos avós Francisco, Nirce e Roberto, pessoas maravilhosas que deixaram muitas saudades e lindos exemplos de superação.

À Prof.^a Dr.^a Mônica Lopes Aguiar pela orientação durante os seis anos de pós-graduação, sendo um exemplo de pesquisadora ética e de bom caráter, pela amizade, confiança incondicional e apoio tanto nos momentos complexos, como para que pudesse lecionar nos concursos temporários em que fui aprovada no decorrer do doutorado.

À Prof.^a Dr.^a Adriana Gioda pela incomensurável contribuição para este trabalho, conhecê-la foi um divisor de águas para o meu doutorado. Agradeço também aos seus orientados Vinícius Lionel Mateus e Helga Ribeiro que me ajudaram muito nas análises químicas, bem como aos técnicos de Química da PUC-Rio, em especial ao Maurício e ao Rafael.

Aos professores Dr. Luís Augusto Martins Ruotolo (UFSCar), Dr.^a Gabriela Cantarelli Lopes (UFSCar), Dr.^a Meuris Gurgel Carlos da Silva (UNICAMP), Dr. Nivaldo Aparecido Correa (USP) e Dr.^a Simone Andrea Pozza (UNICAMP) por aceitarem participar das bancas de qualificação e de defesa da tese, cujas valiosas sugestões nortearam a versão final deste texto.

Aos docentes da UFSCar, Dr. Claudio Alberto Torres Suazo, Dr.^a Clelia Mara de Paula Marques, Dr. Dilson Cardoso, Dr. Erich Kellner, Dr.^a Fabiane Letícia Lizarelli, Dr.^a Gabriela Lopes Cantarelli, Dr. João Batista Oliveira dos Santos e Dr. Romeu Cardozo Rocha Filho, que gentilmente autorizaram o monitoramento de suas salas de aula.

Aos professores que desde a Educação Infantil passaram por minha vida e deixaram bons exemplos, inspiradores, para me tornar professora e pesquisadora, especialmente aos do Colégio Técnico Industrial da UNESP/Bauru que sempre me motivaram para não desistir dos meus objetivos e aos queridos Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini (Departamento de Física – UNESP/Bauru) e Prof. Dr. José Renato Coury (Departamento de Engenharia Química – UFSCar) que orientaram meus trabalhos de Iniciação Científica e são meus eternos “paizões” no mundo acadêmico.

Ao pessoal do Laboratório de Controle Ambiental I do DEQ/UFSCar pelo apoio instrumental constante e a todos os amigos do doutorado que dividiram, além da nossa adorada “salinha”, experiências, conhecimentos, angústias e alegrias durante estes anos, em especial, ao meu querido amigo Carlos Eduardo Crestani, cujo amparo “psicológico” em tempo integral foi imprescindível.

Aos amigos e companheiros desta difícil jornada de monitoramento da qualidade do ar de interiores Prof.^a Ms. Mayumi Kawamoto, Prof.^a Ms. Elaine Schornobay, Eng. Ms. Guilherme Nascimento e Eng. Ms. Lênin Matos que me auxiliaram desde 2010 e graças ao nosso esforço inicial conjunto os projetos de QAI tiveram sucesso em São Carlos.

A todos os meus familiares, ao meu “namorado” Érico e aos meus queridos amigos de Bauru (em especial ao Rafael Salgado, à Livia Gabos e ao Luiz Roberto Bottacin Filho, que estão ao meu lado incondicionalmente há 14 anos), Agudos (destacando minha amiga há 21 anos Helen Benicá) e São Carlos (impossível não citar minhas lindas companheiras de república Mariany Preto, Keisyani Santos e Priscila Uliam) que sempre

torceram pelo meu sucesso profissional e compreenderam minha ausência em diversas ocasiões em todos estes anos dedicados à pós-graduação.

Gostaria de reiterar aqui meus sinceros agradecimentos a todos anteriormente citados e para aqueles que não foram lembrados neste texto, mas que, de alguma maneira, contribuíram para a minha formação e para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

"Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros foram".

(Alexandre Graham Bell)

"Não é o desafio que define quem somos, nem o que somos capazes de ser, mas sim como enfrentamos esse desafio: podemos incendiar as ruínas ou construir, através delas e passo a passo, um caminho que nos leve à liberdade".

(Richard Bach)

RESUMO

As pesquisas sobre a qualidade do ar de interiores (QAI) tornaram-se frequentes nas últimas décadas, porém as normas brasileiras para monitoramento de interiores ainda são escassas e exclusivas para ambientes de climatização artificial. Salas de aula ganharam especial atenção dos pesquisadores devido à comprovação de que altas taxas de ocupação associadas à manutenção predial deficitária e baixas taxas de ventilação contribuem significativamente para a má qualidade do ar, afetando a saúde de professores e alunos. Neste contexto, o material particulado total (MPT) e suas frações respiráveis (MP_{2,5} e MP₁₀), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COVs) devem ser monitorados para evitar efeitos deletérios. Assim, o objetivo desta tese foi avaliar as concentrações internas dos parâmetros supracitados em duas salas de aula climatizadas artificialmente e em duas com ventilação natural na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), bem como em ambiente aberto próximo a elas, fornecendo dados para a comparação entre estes locais e com as legislações específicas para ambientes abertos e fechados. A escolha pela UFSCar considerou sua localização na Rodovia Washington Luís, de intenso tráfego veicular, e sua proximidade com duas indústrias químicas, uma do setor de produção de tintas e solventes e a outra do setor de papel e embalagens, cujas emissões de material particulado e gases podem interferir na qualidade do ar nos arredores. Além dos parâmetros citados, foram avaliados também os níveis de temperatura, umidade relativa do ar, ruídos, as taxas de ocupação e de ventilação das salas em estudo e também foi realizada a caracterização química por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) e Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) dos particulados coletados. Os resultados apontaram que para as salas climatizadas com ar-condicionado os níveis de ruídos e de CO₂ estiveram inadequados segundo as normas pertinentes, o mesmo ocorreu para temperatura, taxa de ocupação e novamente ruídos para as salas com ventilação natural. As análises químicas dos particulados identificaram 27 elementos (Al, Au, Ba, Ca, Cd, Ce, Cu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y, Zn, Zr) possivelmente provenientes de fontes externas como emissão veicular, ressuspensão de solo e queima de cana-de-açúcar e de fontes internas como o giz (que contém compostos de cálcio) utilizado pelos professores. Os experimentos de taxa de ventilação indicaram a importância da renovação de ar no ambiente interno para reduzir as concentrações de CO₂. De um modo geral, concluiu-se que as concentrações de particulados foram maiores nas salas ventiladas naturalmente e para a maioria dos parâmetros, em ambos os tipos de sala, os níveis internos foram superiores aos externos (índice I/E > 1,0).

Palavras-chave: Monitoramento ambiental. Qualidade do ar. Salas de aula.

ABSTRACT

Research in the area of indoor air quality (IAQ) has increased in recent decades, but IAQ standards remain scarce in Brazil and are only applicable to air-conditioned environments. Classrooms have attracted particular research attention because high occupancy rates associated with inadequate building maintenance and low ventilation rates contribute to poor air quality, affecting the health of teachers and students. It is therefore necessary to monitor total particulate matter (TPM), the respirable particulate fractions (PM_{2.5} and PM₁₀), carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), and volatile organic compounds (VOCs) in order to avoid adverse impacts. The objective of the present research was to determine the indoor concentrations of these species in two air-conditioned and two naturally ventilated classrooms at the Federal University of São Carlos (UFSCar), as well as in the adjacent outdoor atmosphere, providing data for comparison of these locations and evaluation of compliance with existing legislation concerning concentrations in open and closed environments. UFSCar is located on the Washington Luís highway, which carries intense vehicular traffic, and is close to two chemical plants, one producing paints and solvents and the other manufacturing paper and packaging, whose emissions of particulate matter and gases affect local air quality. Additional parameters determined were air temperature, relative humidity, noise, and rates of occupancy and ventilation of rooms. The particulates collected were submitted to chemical characterization using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The results showed that in the case of the air-conditioned rooms, levels of noise and CO₂ were unsatisfactory, according to the existing regulations, and the same was found for temperature, occupancy rate, and noise in the rooms with natural ventilation. Chemical analysis of the particulates identified 27 elements (Al, Au, Ba, Ca, Cd, Ce, Cu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y, Zn, and Zr). Possible origins of these elements included external sources such as vehicle emissions, soil dust resuspension, and sugarcane burning, as well as internal sources such as the chalk (which contains calcium compounds) used by teachers. Measurements of ventilation rates revealed the importance of changes of air in the indoor environment for reducing CO₂ concentrations. Overall, it could be concluded that particulate concentrations were higher in the naturally ventilated rooms and that for most of the parameters (in both types of room), levels were higher in the internal environments, compared to the outdoor atmosphere (I/O ratio >1.0).

Keywords: Environmental monitoring. Air quality. Classrooms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aparelho respiratório humano.....	25
Figura 2: Localização da cidade de São Carlos	35
Figura 3: Localização das salas de aula monitoradas próximas da BCo na área norte da UFSCar	36
Figura 4: Sala 3 do DQ: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo	37
Figura 5: Sala 102 do AT5: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo	38
Figura 6: Sala 76 do AT4: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo	39
Figura 7: Sala D do DEQ: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo	40
Figura 8: Sistema de filtração para a coleta de MPT	43
Figura 9: (a) Membrana de Teflon (37 mm) (b) PEM-10 (c) PEM-2,5 (d) Cassete para MPT	43
Figura 10: Partes constituintes dos PEM-2,5 e PEM-10	44
Figura 11: Partes constituintes do chip utilizado no amostrador CMS para monitorar gases.....	53
Figura 12: Diagrama esquemático do balanço de massa na sala de aula e suas principais variáveis	54
Figura 13: Esquema explicativo de um gráfico boxplot.....	57
Figura 14: Concentrações de $MP_{2,5}$ internas e externas comparadas aos padrões da OMS e CETESB.....	61
Figura 15: Concentrações de MP_{10} internas e externas comparadas aos padrões da OMS e CETESB	62
Figura 16: Concentrações de MPT internas e externas comparadas aos padrões da ABRAVA e do CONAMA ...	63
Figura 17: Concentrações médias das frações de particulados	65
Figura 18: Precipitação pluviométrica em São Carlos entre os meses de setembro e dezembro de 2014.....	68
Figura 19: Precipitação pluviométrica X Concentrações de MP internas no período de estudo	69
Figura 20: Composição química das membranas “brancos de caixa” determinada por ICP-OES e ICP-MS	70
Figura 21: Efeitos na saúde humana ocasionados por alguns elementos químicos.....	72
Figura 22: Elementos majoritários identificados nas amostras de $MP_{2,5}$	73
Figura 23: Elementos majoritários identificados nas amostras de MP_{10}	74
Figura 24: Elementos majoritários identificados nas amostras de MPT	75
Figura 25: Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de temperatura.....	81
Figura 26: Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de umidade relativa	84
Figura 27: Diagrama do Conforto Humano com os dados internos de temperatura e umidade plotados como pares ordenados	86
Figura 28: Boxplot comparativo das concentrações internas e externas de CO_2	90
Figura 29: Concentração de CO_2 x Temperatura no período da tarde da amostragem de 06/10/2014.....	92
Figura 30: Boxplot comparativo das concentrações internas e externas de CO	93
Figura 31: Boxplot das concentrações internas de COVs	94
Figura 32: Concentrações de CO_2 para determinação da taxa de ventilação da sala 3 (DQ) com os pontos c_e , c_0 e c_i destacados.....	97
Figura 33: Perfis das concentrações de CO_2 nas salas durante experimento de taxa de ventilação	98
Figura 34: Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de ruídos	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros analíticos obtidos para a técnica de ICP-MS	48
Tabela 2: Parâmetros analíticos obtidos para a técnica de ICP-OES	50
Tabela 3: Concentrações de $MP_{2,5}$, MP_{10} e MPT	60
Tabela 4: Concentrações médias e desvios padrão dos particulados.....	65
Tabela 5: Razões $MP_{2,5}/MP_{10}$ e MP_{10}/MPT	66
Tabela 6: Médias de precipitação pluviométrica na cidade de São Carlos no período de 1992 a 2010.....	68
Tabela 7: Coeficientes de correlação cruzada entre precipitação pluviométrica (PP) e MP.....	69
Tabela 8: Faixas de concentração dos elementos identificados nas amostras de $MP_{2,5}$, MP_{10} e MPT	71
Tabela 9: Velocidade e direção dos ventos nos dias de monitoramento.....	76
Tabela 10: Matriz de correlação das concentrações dos elementos detectados nas amostras de particulados	79
Tabela 11: Médias, medianas, desvios e índices I/E das temperaturas monitoradas	82
Tabela 12: Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de umidade relativa monitorados.....	83
Tabela 13: Índices de calor calculados para os interiores monitorados.....	87
Tabela 14: Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de dióxido de carbono monitorados	89
Tabela 15: Concentrações de ozônio monitoradas pontualmente	95
Tabela 16: Taxas de ocupação calculadas para as salas de aula monitoradas	96
Tabela 17: Dados utilizados para a determinação da taxa de ventilação nas salas estudadas.....	98
Tabela 18: Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de ruído monitorados	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Sistema respiratório e doenças relacionadas ao material particulado.....	25
Quadro 2: Comparação entre as frações MP _{2,5} e MP ₁₀	26
Quadro 3: Principais compostos classificados como COVs	29
Quadro 4: Resumo das normas e limites adotados como referências	33
Quadro 5: Condições operacionais para ICP-MS utilizadas	46
Quadro 6: Condições operacionais para ICP-OES utilizadas	49
Quadro 7: Possíveis fontes externas emissoras de alguns elementos identificados.....	78
Quadro 8: Comparação dos resultados das amostragens internas com as legislações pertinentes.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAVA** - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
- ANVISA** - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
- AT4** - Prédio de Aulas Teóricas nº 4 da UFSCar
- AT5** - Prédio de Aulas Teóricas nº 5 da UFSCar
- BCo** - Biblioteca Comunitária da UFSCar
- CETESB** - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CMS** - *Chip Measurement System* (Sistema de medição por chip)
- CO** - Monóxido de carbono
- CO₂** - Dióxido de carbono (gás carbônico)
- CONAMA** - Conselho Nacional de Meio Ambiente
- COVs** - Compostos orgânicos voláteis
- DEQ** - Departamento de Engenharia Química
- DQ** - Departamento de Química
- EMBRAPA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPA** - *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental)
- EVM-7** - Monitor de qualidade interna do ar com sensor de CO e coletor de partículas
- FRX** - Fluorescência de Raios-X
- ICP-MS** - Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado
- ICP-OES** - Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado
- INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia
- Índice I/E** - Razão entre dados internos e externos
- LD** - Limite de detecção
- LQ** - Limite de quantificação
- MP** - Material particulado
- MP_{2,5}** - Fração do material particulado total em suspensão com partículas de diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm
- MP₁₀** - Fração do material particulado total em suspensão com partículas de diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm
- MPT** - Material particulado total em suspensão que compreende as partículas de diâmetro aerodinâmico menor que 50 µm.
- NBR** - Norma Brasileira
- NR** - Norma Regulamentadora
- OMS** - Organização Mundial da Saúde
- PEM** - *Personal Environmental Monitor* (Monitor ambiental de uso pessoal)
- PTS** - Partículas totais em suspensão
- QAI** - Qualidade do ar de interiores
- RE** - Resolução
- RN** - Resolução Normativa
- UFSCar** - Universidade Federal de São Carlos
- USP** - Universidade de São Paulo
- VMR** - Valor máximo recomendado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Qualidade do ar: histórico e panorama das pesquisas na cidade de São Carlos	19
3.2 Qualidade do ar em salas de aula: algumas pesquisas internacionais e nacionais.....	21
3.3 Parâmetros importantes para o monitoramento ambiental	23
3.3.1 Material particulado.....	24
3.3.2 Temperatura e umidade relativa	26
3.3.3 Dióxido de carbono	27
3.3.4 Monóxido de carbono.....	28
3.3.5 Compostos orgânicos voláteis	28
3.3.6 Taxas de ocupação e de ventilação.....	30
3.3.7 Ruídos.....	30
3.4 Legislações pertinentes a ambientes abertos e fechados	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 Local de estudo.....	35
4.2 Material particulado	41
4.2.1 Preparo das membranas filtrantes.....	41
4.2.2 Sistema de filtração de ar e amostradores de MP	42
4.2.3 Análises químicas por ICP-MS e ICP-OES.....	45
4.2.3.1 Tratamento das membranas filtrantes: extração ácida.....	45
4.2.3.2 Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).....	46
4.2.3.2.1 Calibração do ICP-MS e limites de detecção e quantificação.....	46
4.2.3.3 Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) ...	49
4.2.3.3.1 Calibração do ICP-OES e limites de detecção e quantificação	49
4.3 Temperatura e umidade	50
4.4 Dióxido e monóxido de carbono (CO ₂ e CO) e compostos orgânicos voláteis (COVs)	51
4.5 Taxas de ocupação e de ventilação.....	53
4.6 Ruídos.....	55
4.7 Análises e ferramentas estatísticas	56
4.7.1 Boxplot (gráfico de caixa).....	56
4.7.2 Coeficiente de correlação cruzada	57
4.7.3 P-valor	58

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Material particulado	59
5.1.1 Concentrações de MP _{2,5} , MP ₁₀ e MPT	59
5.1.2 Correlação entre concentrações de MP e níveis de precipitação pluviométrica	67
5.1.3 Composição química do MP e possíveis fontes emissoras.....	70
5.2 Temperatura e Umidade	80
5.2.1 Temperatura.....	80
5.2.2 Umidade	83
5.2.3 Conforto térmico, índice de calor e coeficientes de correlação.....	85
5.3 Dióxido de carbono	89
5.4 Monóxido de carbono e compostos orgânicos voláteis	93
5.5 Taxas de ocupação e de ventilação.....	95
5.6 Ruídos.....	100
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE A	117
APÊNDICE B	120
APÊNDICE C	122
ANEXO A	123

1 INTRODUÇÃO

Monitoramento ambiental é um campo de pesquisa multidisciplinar, cujo foco pode ser a avaliação da qualidade do ar, a análise de conforto acústico, térmico e luminoso, a identificação das fontes emissoras de poluentes químicos e microbiológicos, entre outros.

A interação entre a atmosfera, as fontes emissoras e as condições meteorológicas é determinante para a avaliação da qualidade do ar em um ambiente. Inicialmente foram criadas normas e limites para emissão de poluentes exclusivos para ambientes abertos, que durante décadas foi o foco dos pesquisadores. Porém, comprovações científicas como a de que baixas taxas de troca de ar entre interior e exterior contribuem para o aumento na concentração de poluentes químicos e microbiológicos, nocivos à saúde humana, despertou o interesse pelas pesquisas sobre qualidade do ar de interiores (QAI) que, nas últimas décadas, ganharam destaque no cenário mundial.

Nos últimos anos, a cidade de São Carlos, no interior do estado de São Paulo, tornou-se um local de importantes estudos sobre a qualidade do ar de interiores, tendo sido monitorados os seguintes ambientes: biblioteca universitária (ITO, 2007), universidade pública (NASCIMENTO, 2008), indústria de tintas e solventes (KAWAMOTO, 2011), biblioteca municipal (NASCIMENTO, 2011), escola pública de ensino fundamental e médio (COMIN, 2012), lojas de confecção têxtil (SCHORNOBAY, 2012), mercado municipal (SILVA, 2012; ROTIROTI, 2013), diversas lojas de comércio (ALVES, 2013) e um ônibus do sistema de transporte público municipal (PEITER, 2014).

Uma característica em comum da maioria destes locais estudados em São Carlos foi a ausência de aparelhos de ar condicionado, contando com ventilação natural (facilitada pela abertura de portas e janelas) e presença de poucos ventiladores de teto, o que dificultou a comparação com as legislações vigentes, pois no Brasil ainda são escassas as normas específicas para ambientes internos e as existentes não abrangem os interiores que contam apenas com ventilação natural. Este fato mostrou que, para validar uma avaliação comparativa, é importante que nas pesquisas de monitoramento da qualidade do ar sejam relevados ambientes climatizados artificialmente, confrontando-os com aqueles abertos, comparando as concentrações obtidas com os limites de emissões estabelecidos em legislação.

Na literatura disponível sobre o tema, verifica-se que atualmente um dos principais tipos de ambiente estudado é o escolar, pois os ocupantes de uma sala de aula permanecem, em média, entre 25 e 40 horas semanais neste local, que normalmente apresenta

altas taxas de ocupação e baixas taxas de ventilação, que associadas à manutenção predial deficitária, contribuem para o aumento da concentração e proliferação de contaminantes como material particulado, fungos, bactérias, alérgenos, entre outros potencialmente nocivos principalmente para crianças, adolescentes e idosos (MENDELL; HEATH, 2005; HARGREAVES et al., 2003). Além disso, muitos estudos têm relacionado a diminuição da produtividade de alunos e professores com a má qualidade do ar no interior de salas de aula. Neste tocante, os pesquisadores Bayer, Crow e Fischer (2000) avaliaram inúmeros resultados de pesquisas, realizadas nos Estados Unidos, e concluíram que 20% (uma a cada cinco escolas de ensino fundamental até o nível universitário) apresentavam problemas de qualidade do ar interno, os quais poderiam ser minimizados com o adequado controle da umidade e da ventilação nas salas de aula.

Assim, diante deste cenário alarmante, a avaliação da qualidade do ar dentro e fora de salas de aula climatizadas artificialmente na cidade de São Carlos pode fornecer importantes dados comparativos para serem confrontados com os obtidos em salas de aula com ventilação natural, auxiliando na discussão sobre a convergência ou divergência dos limites de emissão previstos, bem como, para a adoção de medidas corretivas e preventivas para a melhoria das condições ambientais destes locais.

Neste contexto, selecionou-se a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) como local para o desenvolvimento deste estudo. Esta escolha considerou o fluxo diário de pessoas, sua localização na Rodovia Washington Luís (Km 235, SP-310), de intenso tráfego veicular, e a proximidade com duas indústrias químicas, uma do setor de produção de tintas e solventes (que foi monitorada no trabalho de Kawamoto, 2011) e a outra do setor de papel e embalagens, cujas emissões de particulados e gases podem interferir significativamente na qualidade do ar da região.

2 OBJETIVOS

Avaliar os níveis de material particulado total em suspensão (MPT) e de suas frações respiráveis (MP₁₀ e MP_{2,5}), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COVs), ruídos, temperatura e umidade relativa em salas de aula climatizadas artificialmente (por intermédio de aparelhos de ar condicionado), bem como, em salas com ventilação natural (apenas portas e janelas para as trocas de ar), situadas nos arredores da Biblioteca Comunitária (BCo) e em ambiente aberto próximo a elas, na Universidade Federal de São Carlos (São Carlos - SP). Além disso, o escopo deste estudo abrange calcular as taxas de ocupação e ventilação nestes interiores e realizar a caracterização química dos particulados amostrados utilizando Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) e Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

Objetiva-se também comparar os dados obtidos nas salas de climatização artificial com os de ventilação natural, além de confrontá-los interna e externamente e com as legislações específicas para cada tipo de ambiente, avaliando se os valores obtidos convergem ou divergem dos limites estabelecidos, fornecendo subsídios para a discussão de algumas medidas de correção e prevenção adequadas para melhorar a qualidade do ar nestes locais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção trará uma breve revisão da literatura sobre qualidade do ar em ambientes abertos e interiores, apresentando alguns estudos recentes internacionais e nacionais, destacando aqueles desenvolvidos na cidade de São Carlos. Serão apresentadas também informações sobre os parâmetros (variáveis) ambientais que serão monitorados e as legislações pertinentes ao tema, adotadas como referenciais para esta pesquisa.

3.1 Qualidade do ar: histórico e panorama das pesquisas na cidade de São Carlos

A qualidade do ar ou nível de poluição do ar é influenciada pela interação entre as fontes emissoras e a atmosfera, e são as condições meteorológicas locais (temperatura, umidade, ventos, precipitação pluviométrica) que determinam uma maior ou menor dispersão dos poluentes presentes, que podem estar na fase gasosa ou na forma de material particulado (BRUNO, 2005).

O estabelecimento da relação de causalidade entre danos à saúde e poluentes atmosféricos ocorreu a partir de episódios agudos de poluição do ar em centros urbanos da Europa e Estados Unidos. Os relatos datam desde o começo do século XX e um dos mais graves aconteceu no ano de 1952 em Londres (Inglaterra), quando um episódio de inversão térmica no inverno impediu a dispersão de poluentes (material particulado e aqueles gerados por indústrias e aquecedores domiciliares, ricos em enxofre) o que aumentou a concentração em até nove vezes destes poluentes em uma nuvem estacionária sobre a cidade, que ocasionou a morte de mais de 4.000 pessoas em aproximadamente três dias (LOGAN, 1953).

Episódios como o supracitado motivaram a criação, nas décadas seguintes, de órgãos ambientais como a Agência de Proteção Ambiental (EPA), nos Estados Unidos, em 1970, e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 1981, no Brasil, além do grande número de pesquisas em ambientes abertos, que tem importante destaque na correlação com a área de saúde pública.

Na cidade de São Carlos, no ano de 1997 foi iniciado o monitoramento de material particulado total e das frações respiráveis (MP₁₀ e MP_{2,5}) pelo grupo de Controle Ambiental da Universidade Federal de São Carlos, sendo utilizado um amostrador de grandes volumes (Hi-vol) e um amostrador dicotômico em uma estação de amostragem situada na região central da cidade, que foi desativada no ano de 2007. Durante uma década de estudos,

diversos trabalhos importantes foram gerados (CELLI, 1999; MARQUES, 2000; BRUNO, 2005; POZZA, 2005; COMIN, 2007; COMIN, 2009; POZZA, 2009), versando sobre a quantificação e identificação dos elementos químicos presentes no material particulado (MP) amostrado, nas diferenças entre as frações MP₁₀ e MP_{2,5}, nas possíveis fontes emissoras, no desenvolvimento de modelos de previsão das emissões utilizando séries temporais e análises estatísticas, entre outros. Em 2014 esta estação foi reativada e atualmente há um Hi-vol em funcionamento.

A qualidade do ar de interiores (QAI), por sua vez, é uma área de pesquisa surgida na década de 1970, resultante do aumento de edifícios “selados” como forma de racionalizar energia em países desenvolvidos (GIODA; AQUINO NETO, 2003). A descoberta de que baixas taxas de troca de ar, entre ambientes externos e internos, ocasionam um aumento considerável na concentração de poluentes químicos e microbiológicos no ar (TURIEL et al., 1983), principalmente quando associada à manutenção deficitária nos interiores, trouxe como consequência o surgimento da Síndrome dos Edifícios Doentes (SED), que é reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) desde a década de 1980 e justifica o destaque que este tema de pesquisa recebeu nas últimas décadas, principalmente na área de saúde pública. Estima-se que as pessoas passem, em média, de 50 a 70% do seu tempo em ambientes internos, seja em casa, no trabalho, no transporte, ou mesmo em locais de lazer (BRICKUS; AQUINO NETO, 1999).

No Brasil, apenas em 1992 iniciaram-se os estudos sobre a poluição química no ar de interiores (GIODA; AQUINO NETO, 2003) e atualmente ainda é notória a escassez de estudos neste tema, principalmente devido ao país apresentar clima subtropical, tornando desnecessário o uso constante de sistemas de refrigeração.

Na cidade de São Carlos a primeira importante pesquisa desenvolvida sobre QAI foi iniciada no ano de 2004 e teve como cenários a Biblioteca Comunitária da Universidade Federal de São Carlos e a Biblioteca Pública Amadeo Amaral, em um estudo comparativo com bibliotecas situadas na cidade de São Paulo sobre as concentrações obtidas para as frações MP₁₀ e MP_{2,5} e os níveis de temperatura e umidade (ITO, 2007).

Na última década, devido à parceria entre professores da UFSCar e da USP em São Carlos, houve a consolidação de um importante grupo de pesquisa experimental sobre qualidade do ar de interiores, que já monitorou salas de aula da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) - Campus 2 (NASCIMENTO, 2008), o setor de produção de uma indústria química de tintas e solventes (KAWAMOTO, 2011),

todos os andares da Biblioteca Pública Amadeo Amaral (NASCIMENTO, 2011), salas de aula de turmas de ensino fundamental e médio da Escola Estadual Dr. Álvaro Guião (COMIN, 2012), lojas de confecção têxtil na região central da cidade (SCHORNOBAY, 2012), todo ambiente interno do mercado municipal (SILVA, 2012; ROTIROTI, 2013), diferentes tipos de lojas de comércio (ALVES, 2013) e o interior de um ônibus circular pertencente à frota do sistema de transporte coletivo do município (PEITER, 2014) .

Os parâmetros monitorados nas pesquisas citadas incluíam os níveis de material particulado, temperatura, umidade, dióxido de carbono, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, contaminantes microbiológicos (fungos e bactérias) e ruídos, objetivando analisar a congruência com os limites previstos em normas ambientais, bem como, estimar quais as medidas corretivas e preventivas mais adequadas a cada tipo de ambiente.

3.2 Qualidade do ar em salas de aula: algumas pesquisas internacionais e nacionais

A QAI nas escolas é um tema relativamente recente na literatura e a maioria dos estudos, a nível mundial, foram realizados na Europa, América do Norte e em alguns pontos da Ásia, enquanto os estudos brasileiros pioneiros foram realizados na região sudeste e atualmente o tema tem se expandido pelas demais regiões. Algumas pesquisas internacionais e nacionais que apontaram interessantes conclusões sobre QAI em salas de aula encontram-se sintetizadas a seguir.

Lee e Chang (2000) avaliaram a qualidade do ar interno e externo em cinco escolas de Hong Kong (China), que eram ventiladas artificialmente com ar-condicionado ou ventilador de teto, e concluíram que os principais problemas nas salas de aula monitoradas eram os altos níveis de MP_{10} e CO_2 .

Bartlett et al. (2004) pesquisaram sobre as concentrações de poluentes químicos e microbiológicos em escolas de ensino fundamental da Columbia Britânica no Canadá e constataram que salas de aula ventiladas naturalmente apresentaram concentrações médias maiores do que as de ventilação artificial por meio mecânico.

Godwin e Batterman (2007) publicaram o resultado de suas pesquisas em 64 salas de aula de ensino fundamental e médio de Michigan (Estados Unidos) comparando os níveis internos e externos dos parâmetros pesquisados (taxas de ventilação, COVs, bioaerossóis, umidade relativa do ar e temperatura). De modo geral, as salas apresentaram baixos níveis de COVs e bioaerossóis, limites aceitáveis de temperatura e umidade, porém taxas de ventilação deficientes foram encontradas com frequência.

Pegas et al. (2010) mediram simultaneamente a poluição externa e interna em salas de aula de três escolas de Lisboa (Portugal) e observaram que quando a razão entre as concentrações de poluentes internos e externos (índice I/E) era maior que 1 indicava que as fontes internas e as condições físicas dos prédios escolares interferiam negativamente no ar das salas de aula.

Um estudo publicado por Shaughnessy et al. (2011) relaciona as taxas de ventilação em salas de aula com o desempenho acadêmico, verificado por intermédio de testes de múltipla escolha padronizados, de 100 estudantes de ensino fundamental de dois distritos do sudoeste dos Estados Unidos. Uma das conclusões deste trabalho foi que há uma correlação linear crescente entre as taxas de ventilação e o desempenho acadêmico de alunos, para a faixa entre 0,9 e 7,1 L s⁻¹ de ar por pessoa, ou seja, quanto maior a taxa de ventilação, melhor era o rendimento dos estudantes.

Focando nos estudos brasileiros, no ano de 2006, Mesquita e Araújo analisaram os níveis de CO₂, temperatura e umidade do ar nas salas de aula do campus da Universidade de Fortaleza (CE) e a pesquisa revelou que praticamente a totalidade dos ambientes com climatização artificial apresentava níveis de CO₂ acima dos recomendados nas normas técnicas nacionais.

Em 2008, Avigo Júnior monitorou as concentrações de MP e COVs em salas de aula de duas escolas de ensino fundamental de Curitiba (PR) e realizou a caracterização do MP amostrado interna e externamente. A partir da análise química realizada por ED-XRF (fluorescência de raios-X por energia dispersiva) conseguiu traçar os possíveis perfis de fontes emissoras para as frações respiráveis dos particulados e dentre suas conclusões, destacou que o trânsito do local estava comprometendo diretamente a qualidade do ar das escolas.

Também no ano de 2008, Nascimento realizou um estudo no Campus 2 da USP de São Carlos (SP) monitorando níveis de temperatura, umidade relativa, ruído, COVs e MP. Ele constatou valores inadequados de ruídos e temperatura durante o período de amostragem e verificou que a concentração de material particulado se alterava conforme o ritmo de aulas, aumentando com o início das atividades pela possível ressuspensão de material depositado, além da produção de novas quantidades derivadas, por exemplo, do uso de giz.

Alves (2009) monitorou as concentrações de MP dentro e fora de salas de aula de três escolas de ensino fundamental da cidade de Colombo (PR) e analisou a presença de sintomas respiratórios nos alunos. Esta cidade tem sua economia focada em indústria de

produção de cal, e a caracterização química do MP amostrado possibilitou avaliar a interferência das emissões industriais na QAI das escolas, onde elementos como Ca, S, Cl, Pb e As, que podem ser originados nestas indústrias, encontravam-se em níveis elevados.

Morais et al. (2010) avaliaram a qualidade microbiológica do ar interno de uma instituição de ensino superior da cidade de Itumbiara (GO) e concluíram que o ar de 51% das salas avaliadas estava contaminado com contagens bacterianas acima do limite proposto pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), representando um desconforto ao bem-estar dos alunos e professores que se expõem por tempo prolongado nestes espaços, podendo ocasionar sérios riscos à saúde.

Comin (2012) monitorou duas salas de aula da Escola Estadual Dr. Álvaro Guião, analisando os níveis de material particulado total (MPT) e suas frações respiráveis (MP_{2,5} e MP₁₀), temperatura, umidade relativa do ar, dióxido de carbono (CO₂) e ruídos. Os resultados indicaram que os níveis de MPT, ruídos, temperatura e umidade extrapolaram os limites preconizados em normas técnicas nacionais, enquanto a análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) do MP identificou os seguintes elementos: Ca, Cu, Fe, K, S, Si e Ti, provenientes de fontes externas como emissão veicular, ressuspensão de solo e queima de cana-de-açúcar e de fontes internas como o giz (que contém compostos de cálcio) utilizado pelos professores. Todos os parâmetros monitorados dentro e fora das salas de aula apresentaram níveis mais elevados no ambiente interno, com índices I/E (razão entre concentrações médias internas e externas) na maioria das vezes muito superiores a 1.

3.3 Parâmetros importantes para o monitoramento ambiental

Monitorar ambientes internos implica em uma série de etapas, tais como: planejamento, com determinação e definição de objetivos; obtenção dos dados através de medidas dos níveis dos poluentes e de variáveis que interferem no conforto humano (como temperatura e umidade); análise dos dados; divulgação dos resultados e proposição de medidas corretivas e preventivas para os problemas que forem encontrados.

Neste trabalho, após a revisão bibliográfica inicial, relevando as características e localização da universidade selecionada, elegeram-se os seguintes parâmetros para serem monitorados: material particulado (total e as frações MP_{2,5} e MP₁₀), temperatura, umidade relativa, dióxido de carbono, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, taxas de ocupação e de ventilação e ruídos, os quais serão explanados a seguir.

3.3.1 Material particulado

Na atmosfera, suspensões de pequenas partículas (sólidas e líquidas) em gases são chamadas de aerossóis e nas pesquisas científicas usualmente apenas os sólidos suspensos são designados por material particulado (CELLI, 1999).

Inicialmente a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), definiu como material particulado total em suspensão (no Brasil abreviado como MPT ou PTS) as partículas de até 100 micrômetros. Em 1987, a EPA estabeleceu um novo padrão de qualidade do ar, denominado material particulado inalável, que abrange as partículas com diâmetro aerodinâmico de 0 a 10 μm , representadas pela sigla MP_{10} (MARQUES, 2000; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2014). Dez anos depois, a EPA baseada em evidências de que as partículas com menores diâmetros aerodinâmicos são mais patogênicas, propôs a inclusão de um novo padrão de qualidade do ar, subdividindo nas frações:

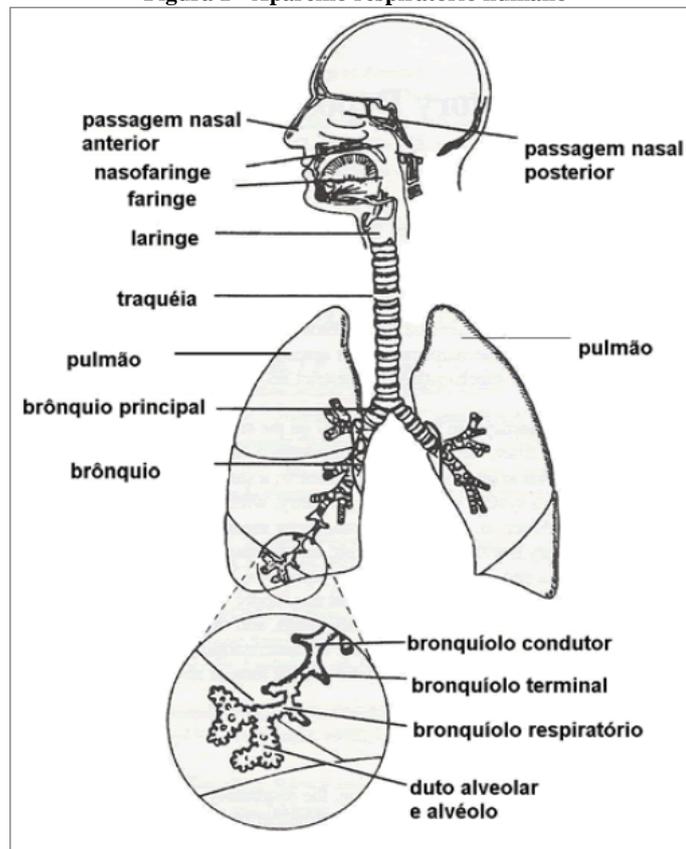
- MP_{10} : partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 μm ;
- $\text{MP}_{2,5}$: partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 μm .

O diâmetro aerodinâmico é a principal propriedade da partícula quando o interesse é a caracterização do seu comportamento na filtração, na deposição no sistema respiratório ou na avaliação do desempenho de equipamentos de limpeza de gases. Para partículas irregulares, seu diâmetro aerodinâmico é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que possui a mesma velocidade terminal da partícula (HINDS, 1999).

O material particulado é um parâmetro de grande interesse em pesquisas devido principalmente à sua nocividade ao sistema respiratório humano. Hinds (1999) ressalta que a deposição das partículas no trato respiratório depende do seu tamanho e pode ocorrer pelos mecanismos de impactação, sedimentação e difusão. Assim, as partículas com diâmetros aerodinâmicos maiores que 10 μm são retidas por impactação inercial no nariz, faringe, laringe ou traqueia, enquanto as partículas menores tendem a alcançar os pulmões e sofrer sedimentação, nas regiões traqueobronquial e alveolar.

Os órgãos do aparelho respiratório podem ser visualizados na Figura 1 (onde foi destacada a região dos alvéolos e bronquíolos), enquanto no Quadro 1 o sistema respiratório encontra-se subdividido em vias aéreas superiores, região torácica e região de troca de gases, associando cada uma às doenças causadas pela exposição a altas concentrações de MP.

Figura 1 - Aparelho respiratório humano



Fonte: HINDS, 1999.

Quadro 1 - Sistema respiratório e doenças relacionadas ao material particulado

Sistema respiratório	Órgãos	Doenças
Vias aéreas superiores	Nariz	Irritação de septo nasal, faringe e laringe. Câncer de faringe e laringe.
	Boca	
	Faringe	
	Laringe	
Região torácica	Traqueia	Broncoconstrição. Bronquite crônica. Câncer bronquial.
	Brônquios	
	Bronquíolos	
Região de troca de gases	Bronquíolos respiratórios	Pneumoconioses. Enfisema. Alveolite. Câncer pulmonar.
	Dutos alveolares	
	Sacos alveolares	
	Alvéolos	

Fonte: ITO, 2007.

As frações MP_{10} e $MP_{2,5}$, além do diâmetro aerodinâmico e dos locais de deposição no trato respiratório, também diferem quanto à sua formação e tempo de permanência na atmosfera, composição, solubilidade e distância de dispersão. Estas especificações para cada fração encontram-se sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Comparação entre as frações MP_{2,5} e MP₁₀

	Fração MP_{2,5}	Fração MP₁₀
Formado por:	reações químicas ou vaporização; nucleação, condensação e coagulação; evaporação de gotículas nas quais os gases dissolvem e reagem.	quebras mecânicas, moagem, abrasão de superfícies, ressuspensão de poeira.
Composto de:	sulfatos, nitratos, amônia, carbono elementar, compostos orgânicos (ex.: aromáticos) e metais (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn).	poeira ressuspensa; cinzas de combustão; óxidos de Si, Al, Ti, Fe; sais como CaCO ₃ , NaCl; esporos de fungos, fragmentos de plantas e animais.
Solubilidade:	muito solúvel, higroscópico e deliquescente.	pouco solúvel e não higroscópico.
Fontes:	combustão de carvão, óleos, madeira, combustíveis de automóveis; transformações atmosféricas de NO _x , SO _x , e compostos orgânicos; processos de alta temperatura, fundições e moinhos de aço.	ressuspensão de poeira industrial e de solo espalhadas em ruas e estradas; suspensão provindas de atividades modificadoras do solo (mineração, agricultura, rodovias não pavimentadas); fontes biológicas; construção e demolição; combustão incompleta de carvão e de óleos.
Tempo de meia vida na atmosfera:	dias, até semanas.	minutos a horas.
Distância de dispersão:	centenas a milhares de quilômetros.	menos de um a dezenas de quilômetros.

Fonte: CELLI, 1999.

3.3.2 Temperatura e umidade relativa

A temperatura é a propriedade que nos diz a direção de um fluxo de energia (MORTIMER; AMARAL, 1998), indicando o grau de aquecimento de um corpo. De acordo com a literatura médica, o homem possui mecanismos internos de regulação térmica para manter a temperatura corporal em torno de 37 °C, porém há uma troca contínua de calor com o ambiente, pela radiação, recebendo calor de objetos mais quentes e irradiando para aqueles mais frios que o seu corpo. O calor radiante muito intenso pode transferir calor ao corpo que elimina a quantidade de calor em excesso por meio da evaporação que, por sua vez, depende do movimento do ar e da umidade relativa (SILVA, 1995).

A umidade relativa do ar (ou grau higrométrico do ar) pode ser definida como a razão entre a pressão de vapor d'água na atmosfera e a pressão de vapor d'água saturado (COSTA, 2003) ou como o quociente da umidade absoluta do ar pela umidade absoluta do ar saturado para a mesma temperatura e pressão atmosférica (VOLTANI, 2009). Recomenda-se que a umidade de um ambiente seja cuidadosamente controlada, pois em altos níveis pode facilitar o crescimento de mofos ou bolores adversos à saúde humana, enquanto a baixa umidade pode ser uma fonte de desconforto por causar, por exemplo, ressecamento nas mucosas nasais e dos olhos (BOTKIN; KELLER, 2011).

A temperatura e a umidade relativa influem diretamente no desempenho do trabalho humano, tanto sobre a produtividade, como sobre os riscos de acidentes (SILVA, 1995). Nos ambientes escolares, os níveis de temperatura e umidade tem grande influência no desempenho dos alunos, já que estes permanecem longos períodos dentro das salas de aula e quando expostos a níveis inadequados, podem apresentar redução da concentração, sonolência e adoção de atitudes dispersivas. Deste modo, ambas variáveis devem ser relevadas para a análise de conforto em interiores e, além disso, também influem significativamente no grau de dispersão dos poluentes presentes, sendo dados importantes para o monitoramento da qualidade do ar.

3.3.3 Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é um composto químico inodoro de geometria linear e caráter apolar. Devido às atrações intermoleculares muito fracas, em condições normais de temperatura e pressão, apresenta-se na forma gasosa (LEE, 2001). É originado, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis e como produto do processo de respiração, pelo qual animais e plantas produzem energia, equacionado abaixo:



Segundo Persily (1996), o nível de CO₂ em interiores pode ser considerado como um indicador da QAI, por ser potencialmente prejudicial à saúde dos ocupantes, por suas relações com outros contaminantes internos e com a taxa de ventilação externa, entre outros.

Alguns efeitos físicos da exposição humana a concentrações de CO₂ acima de 1.000 ppm são tontura, dor de cabeça, náuseas e letargia. Este gás torna-se fatal para o ser humano em elevadas concentrações, em torno de 30.000 ppm para exposição de 10 min, pois pode provocar asfixia por deslocar o oxigênio (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2001), logo, recomenda-se que nos ambientes internos seja evitada a saturação do ar por este gás, facilitando a troca de ar com o ambiente externo através de uma taxa de ventilação adequada.

Em exteriores, por sua vez, o grande interesse pelo monitoramento de CO₂ é a sua relação com o aquecimento global, fenômeno denominado de “efeito estufa”, que é tema recorrente nas pesquisas científicas e pivô de algumas controvérsias entre os especialistas.

3.3.4 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e tóxico, sendo caracterizado como um asfixiante químico. Sua toxicidade é devido à sua capacidade de formar um complexo com a hemoglobina do sangue, impedindo que a hemoglobina das hemácias transporte oxigênio pelo corpo (LEE, 2001). Esta deficiência de oxigênio leva à inconsciência e finalmente à morte.

A presença de CO em interiores, além da descrita redução da capacidade de o sistema circulatório transportar o oxigênio, mesmo em concentrações não letais, pode causar dor de cabeça, náusea e prejudicar o desempenho das tarefas que exigem concentração (BOTKIN; KELLER, 2011).

Aproximadamente 90% do CO na atmosfera provêm de fontes naturais e os outros 10% são oriundos principalmente de incêndios, emissões de escapamento de automóveis e de outras fontes de queima incompleta de compostos orgânicos (BOTKIN; KELLER, 2011).

Na literatura científica há muitos relatos de pessoas que foram asfixiadas acidentalmente pelo monóxido de carbono, produzido a partir da combustão incompleta de combustíveis, em casas, barracas e *trailers*. Assim, esta elevada nocividade deste composto constitui na principal motivação para incluí-lo nas pesquisas sobre qualidade do ar de interiores.

3.3.5 Compostos orgânicos voláteis

A conceituação de compostos orgânicos considerados voláteis é motivo de discussão por parte da comunidade científica, pois enquanto algumas definições são baseadas principalmente no ponto de ebulição dos compostos e na sua composição química, outras consideram suas propriedades de reatividade fotoquímica (UEDA, 2010).

Segundo Hester e Harrison (1995), o termo COVs refere-se àqueles compostos orgânicos que estão presentes na atmosfera no estado gasoso, embora sejam líquidos ou sólidos sob condições ambientais de temperatura e pressão, ou seja, tais compostos a 20 °C têm sua pressão de vapor compreendida entre 1 e 760 Torr (equivalente ao intervalo de 0,00132 a 1,0 atm). Entretanto, essa definição é muito limitada e, atualmente, os órgãos internacionais de proteção ambiental os define em função das reações sofridas por tais compostos na atmosfera, por exemplo, a EPA define COVs como sendo “quaisquer compostos que contenham carbono e que participem de reações fotoquímicas na atmosfera, excluindo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbetos ou carbonatos metálicos e carbonato de amônio” (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2015).

Desta forma, uma grande variedade de substâncias, pertencentes a famílias diferentes de compostos orgânicos, constitui os COVs, conforme mostra o Quadro 3.

Quadro 3 - Principais compostos classificados como COVs

Família	Principais compostos
Alcanos	Metano Etano Propano Butano
Alcenos	2-Buteno
Alcadienos	1,3-Butadieno
Cicloalcanos	Cicloexano Metilcicloexano
Hidrocarbonetos aromáticos	Benzeno Tolueno
Hidrocarbonetos halogenados	Cloro de metila Clorofórmio Tetracloro de Carbono 1,2- Dicloroetano 1,2- Dicloropropano Clorofluorocarbonos (Freon)
Compostos nitrogenados e oxigenados	Nitrato de Peroxiacetila (PAN) Formaldeído

Fonte: ALBUQUERQUE, 2007.

Os COVs penetram no organismo humano através do ar inspirado ou a partir de síntese metabólica e eles podem ter impacto sobre a saúde humana através de mecanismos diretos (como toxicidade) e indiretos (como a formação fotoquímica do ozônio na atmosfera). Alguns compostos afetam os sentidos humanos devido ao seu odor, outros exercem efeitos narcóticos e certas espécies são tóxicas (HESTER; HARRISON, 1995).

Em ambientes internos a exposição humana a altos níveis de COVs pode causar irritação nos olhos e afetar o sistema nervoso central, enquanto em baixos níveis eles não são considerados de risco imediato à saúde humana, porém alguns compostos possuem propriedades mutagênicas e carcinogênicas para longos períodos de exposição (UCHIYAMA et al., 1999). É importante ressaltar que um composto pode interagir com o outro (processo conhecido como sinergia) e fazer com que os efeitos à saúde sejam agravados, isto é, os gases juntos apresentam um efeito pior que a soma dos efeitos dos gases isolados.

Apesar de muitas pesquisas apontarem uma vasta gama de COVs exalados pelo homem, as emissões humanas geralmente são desconsideradas em estudos sobre qualidade do ar e alguns estudos como o de Fenske e Paulson (1999) sugerem que deveriam ser relevadas, pois, embora as emissões humanas sejam fontes negligenciáveis de COVs nas escalas regional e global (menos de 4% e 0,3%, respectivamente), pode se tornar uma importante (e algumas vezes a principal) fonte de COVs em ambientes internos com muitos ocupantes.

Alguns COVs, na presença de radiação solar e de dióxido de nitrogênio, reagem quimicamente e produzem ozônio na troposfera. Assim, embora seja um composto inorgânico, monitorar ozônio tem sido comum nas pesquisas sobre qualidade do ar.

O ozônio (O₃) é um gás instável que possui um odor ligeiramente doce característico e segundo Lee (2001) frequentemente está associado a equipamentos elétricos que produzem faíscas. É considerado o oxidante fotoquímico mais comum e uma forma de emissão natural na baixa atmosfera é resultante de condições meteorológicas instáveis como as violentas tempestades de raios. Possui alto poder oxidante e é altamente tóxico, portanto a exposição contínua mesmo a concentrações tão baixas quanto 0,1 ppm deve ser evitada. Alguns efeitos sobre a saúde conhecidos são: agravamento de asma, lesão às células do sistema respiratório, redução da elasticidade do tecido pulmonar, tosse e irritação nos olhos (BOTKIN; KELLER, 2011).

3.3.6 Taxas de ocupação e de ventilação

Nos ambientes internos, a quantidade de ocupantes e a vazão de renovação de ar são duas informações importantes para o monitoramento da qualidade do ar.

O índice de ocupação humana por metro quadrado, referenciado como taxa ou densidade de ocupação, considera o total da área passível de ocupação que norteia a vazão de ar adequada àquele ambiente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2003), pois, em interiores, a poluição é essencialmente proporcional ao número de pessoas presentes.

Salienta-se que monitorar as taxas de renovação do ar é imprescindível para controlar a diluição de poluentes e gases, principalmente as concentrações de CO₂ que, por ser produto da respiração humana, costuma apresentar níveis elevados em locais com muitos ocupantes.

3.3.7 Ruídos

Ruído é qualquer som “indesejado ou perturbador”, segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016). O som torna-se indesejável quando interfere nas atividades normais de um ser humano, comprometendo sua qualidade de vida.

Fisicamente, segundo Rios (2003), pode ser descrito como “todo fenômeno acústico não periódico, sem componentes harmônicos definidos” e de acordo com a NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 1978), os ruídos classificam-se em:

- ruído de impacto: aquele que apresenta picos de energia acústica de duração inferior a 1 (um) segundo, a intervalos superiores a 1 (um) segundo.
- ruído contínuo ou intermitente: aquele que não se classifica como ruído de impacto.

Nas últimas décadas, os ruídos tornaram-se uma das formas de poluição que mais afetam pessoas em todo mundo e desde meados da década de 80, a OMS passou a tratá-lo como problema de saúde pública (RIOS, 2003).

Estudos sobre a poluição sonora concluíram que os efeitos ambientais do ruído dependem não só da energia total (medida em decibéis), mas também da altura, frequência, padrão de tempo e duração da exposição ao som (BOTKIN; KELLER, 2011). O ouvido humano pode suportar sons de até 60 dB sem danos ou perda auditiva. Porém, qualquer ruído acima de 80 dB é potencialmente perigoso, pois a exposição a altos níveis de ruídos pode causar perda auditiva parcial ou total, provocar alterações na resposta vegetativa (involuntária ou inconsciente) como dilatação das pupilas e mudanças gastrointestinais; alterações bioquímicas como variações na produção de cortisona e de glicose; alterações cardiovasculares como o aumento da pressão sanguínea; e efeitos sociológicos como irritação, perturbação do sono e prejuízos a concentração e desempenho (ARATO, 2002).

Nos estudos sobre qualidade do ar de interiores, o ruído tornou-se um parâmetro de interesse devido a alguns compostos químicos e metais pesados (como chumbo, manganês, estanho e mercúrio) terem reconhecido potencial ototóxico, ou seja, podem causar danos aos sistemas coclear e/ou vestibular dos seres humanos, especialmente quando associados a altos níveis de ruídos, aumentando o prejuízo auditivo (SOUZA; BERNARDI, 2001). Além disso, conforme descrito no parágrafo anterior, os ruídos interferem no metabolismo humano, conseqüentemente, por exemplo, podem interferir de modo indireto na emissão de dióxido de carbono pela respiração.

3.4 Legislações pertinentes a ambientes abertos e fechados

No Brasil, a poluição em ambientes abertos (exteriores) começou a ser regulamentada a partir da publicação da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente “CONAMA” nº 005, de 15 de junho de 1989 (BRASIL, 1989), que criou o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), visando à proteção da saúde e o bem-estar da população e estipulando limites para os níveis de emissão de poluentes. No ano seguinte, a Resolução CONAMA nº 003, de 28 de junho de 1990 (BRASIL, 1990), estabeleceu os padrões de qualidade do ar e os limites de concentração para os poluentes: partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre,

monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio; trazendo também os conceitos de padrões primários e secundários de qualidade do ar, apresentados a seguir:

- padrão primário → concentração de poluente que, quando ultrapassada, poderá afetar a saúde da população.
- padrão secundário → concentração de poluente abaixo da qual se prevê o mínimo efeito adverso para a população e o mínimo dano à flora, à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Além do CONAMA, que regulamenta, em nível nacional, os limites de tolerância dos poluentes em ambientes abertos, especificamente para o estado de São Paulo há as normas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que no ano de 2013 propôs novos padrões (SÃO PAULO, 2013) com base nos indicados pela OMS (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2005) em seu Guia de Qualidade do Ar.

A qualidade do ar em ambientes internos teve como norma pioneira a Portaria nº 3523, de 28 de agosto de 1998, da ANVISA (AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 1998) que aprovou o regulamento técnico para manutenção e limpeza de sistemas de climatização de ambientes. Antes desta, havia apenas limites de tolerância para agentes químicos previstos no Anexo 11 da Norma Regulamentadora nº 15 (NR 15) da Portaria nº 3214 do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 1978) que versa sobre atividades e operações insalubres.

Em 16 de janeiro de 2003, foi publicada a Resolução (RE) nº 9 da ANVISA (AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 2003), que revisou a Resolução nº 176 (AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 2000), atualizando os padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público, incluindo recomendações presentes na Norma Brasileira (NBR) nº 6401 da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) sobre temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar.

Também no ano de 2003, a ABRAVA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2003) publicou a Resolução Normativa (RN) nº 02, cancelando e substituindo a RENABRAVA II, publicada em 2000, apresentando diretrizes de projeto, operação e manutenção da qualidade do ar interior em locais providos de sistema de ventilação artificial.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui normas para o monitoramento dos níveis de ruído em diversos ambientes. A NBR 10151, publicada em 1987 e atualizada em 2000, traz os direcionamentos para verificação dos valores nos ambientes, enquanto que a NBR 10152, publicada em 1987, versa sobre os limites para cada tipo de ambiente interno (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, 2000).

No Quadro 4 seguem elencadas as normas que foram adotadas como referência para cada parâmetro desta pesquisa nos ambientes abertos e fechados monitorados e na sequência há algumas observações sobre elas.

Quadro 4 - Resumo das normas e limites adotados como referências

Parâmetro	Normas / Limites propostos	
	Ambientes internos (fechados)	Ambientes externos (abertos)
MPT	ANVISA (RE 09/2003)* → 80 $\mu\text{g m}^{-3}$ (amostragens entre 25 minutos e 3 horas e 40 minutos) ABRAVA (RN 02/2003) → 60 $\mu\text{g m}^{-3}$ (não há especificação do tempo de amostragem)	CONAMA (RE 03/1990) → 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ (padrão secundário, amostragens de 24 horas)
MP ₁₀	Não há legislação específica no Brasil	OMS (2005); CETESB (2013)** → 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ (amostras de 24 horas)
MP _{2,5}	Não há legislação específica no Brasil	OMS (2005); CETESB (2013)** → 25 $\mu\text{g m}^{-3}$ (amostras de 24 horas)
Temperatura	ANVISA (RE 09/2003) → de 23 a 26 °C (verão) e de 20 a 22 °C (inverno)	-----
Umidade	ANVISA (RE 09/2003) → de 40 a 65% (verão) e de 35 a 65% (inverno)	-----
CO ₂	ANVISA (RE 09/2003) → 1.000 ppm	-----
CO	Ministério do Trabalho (NR 15/1978) → 39 ppm (até 48 h/semana)	CETESB (2013) → 9 ppm (amostras de 8 horas)
Taxa de ocupação	ABRAVA (RN 02/2003) → 50 pessoas/100 m ² (2 m ² /pessoa; específico para salas de aula)	-----
Taxa de ventilação	ABRAVA (RN 02/2003) → 7,5 L s ⁻¹ por pessoa (específico para salas de aula)	-----
Ruídos	ABNT (NBR 10152/1987) → 40 a 50 dB (específico para salas de aula)	ABNT (NBR 10152/1987) → 45 a 55 dB (específico para circulação em ambientes escolares)

Fonte: Elaborado pela autora baseada nas referências AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 2003; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2003; BRASIL, 1978, 1990; ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2005; SÃO PAULO, 2013.

* A ANVISA recomenda utilizar no monitoramento de MPT a vazão de 2 L min⁻¹ para coletar um volume mínimo de 50 litros (correspondendo a um tempo de amostragem de 25 minutos) e um volume máximo de 400 litros (equivalente a 3 horas e 40 minutos).

** Adotaram-se os padrões finais propostos pela CETESB com base na OMS. Atualmente, na 1ª fase de adequação, as concentrações toleráveis para 24 horas são 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ para MP₁₀ e 60 $\mu\text{g m}^{-3}$ para MP_{2,5}.

Cabe ressaltar que as resoluções adotadas da ANVISA e da ABRAVA são específicas para interiores climatizados artificialmente, porém não incluem limites para gases nocivos à saúde (como o CO e COVs), sendo necessário recorrer a NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego, embora seu escopo seja para ambientes insalubres.

Conforme apontado no Quadro 4, não existem padrões estabelecidos para as frações $MP_{2,5}$ e MP_{10} em ambientes internos, portanto para critério de comparação podem ser adotados os limites de 25 e 50 $\mu\text{g m}^{-3}$, indicados pela CETESB e OMS. Embora eles sejam para amostragens de 24 horas, em salas de aula recomenda-se que o monitoramento seja efetuado somente quando a mesma estiver ocupada, porém não há normas nacionais para amostragens de menor duração.

A legislação brasileira não estabelece limites para taxas de emissões de COVs totais e para exteriores também não há normas com valores máximos definidos para temperatura, umidade e dióxido de carbono, enquanto as taxas de ocupação e ventilação são exclusivas para interiores.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentadas as características dos locais de estudo (quatro salas de aula e pátios laterais externos), os procedimentos e equipamentos utilizados na coleta de dados pelo monitoramento ambiental. Serão também descritas as principais análises estatísticas utilizadas para o tratamento dos dados.

4.1 Local de estudo

São Carlos é uma cidade localizada próxima ao centro geográfico do estado de São Paulo (Figura 2) que possui 241.389 habitantes em uma área de 1.136 km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016), apresentando clima classificado como tropical de altitude, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2015). Situa-se a 21°30' e 22°30' de Latitude Sul e 47°30' e 48°30' de Longitude Oeste, com altitude média de 856 m e apresenta destaque nos setores tecnológico, industrial e acadêmico, abrigando duas universidades públicas: a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e a Universidade de São Paulo (USP).

Figura 2 - Localização da cidade de São Carlos



Fonte: BRUNO, 2005.

A UFSCar foi a primeira instituição federal de ensino superior situada no interior do Estado de São Paulo e atualmente possui quatro *campi*. O *campus* de São Carlos, selecionado como cenário deste estudo, foi fundado em 1968 às margens da Rodovia Washington Luís (Km 235, SP-310) e tem 645 hectares de extensão, sendo 105.000 m² de área construída (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2014), situando-se a 21°58'42" de Latitude Sul e a 47°52'52" de Longitude Oeste.

Na UFSCar, um dos locais de maior tráfego urbano e veicular é nos arredores da Biblioteca Comunitária (BCo), localizada na área norte, onde circulam semanalmente em

torno de 2.280 pessoas (BIBLIOTECA COMUNITÁRIA, 2015), por este motivo optou-se por monitorar salas de aula de prédios próximos à BCo, que recebem todos os dias inúmeros estudantes de graduação, pós-graduação (especialização, mestrado e doutorado) e professores.

A UFSCar possui dez prédios para aulas teóricas dos cursos de graduação (conhecidos como “AT”) e nos arredores da BCo selecionaram-se dois como locais de estudo: o AT4 (sala 76, dista 130 m da BCo) e o AT5 (sala 102, dista 360 m da BCo), pois ambos possuem salas de aula com ventilação exclusivamente natural (apenas portas e janelas garantem a troca de ar). A maioria das salas que possuem climatização artificial (por intermédio de aparelhos de ar condicionado) situa-se nos departamentos de pesquisa e destinam-se para aulas dos cursos de pós-graduação. Assim, considerando também a proximidade com a BCo, selecionaram-se salas de aula do Departamento de Química (DQ, sala 3, dista 215 m da BCo) e do Departamento de Engenharia Química (DEQ, sala D, dista 75 m da BCo). Em ambas as salas há apenas um aparelho de ar condicionado do tipo *split*, sendo do modelo MSE-18CR (marca Midea, capacidade de refrigeração: 18.000 BTU/h) o da sala 3 (DQ) e do modelo GST36-22L/A (marca Gree, capacidade de refrigeração: 36.000 BTU/h) o da sala D (DEQ). A Figura 3 mostra a localização dos prédios cujas salas foram estudadas.

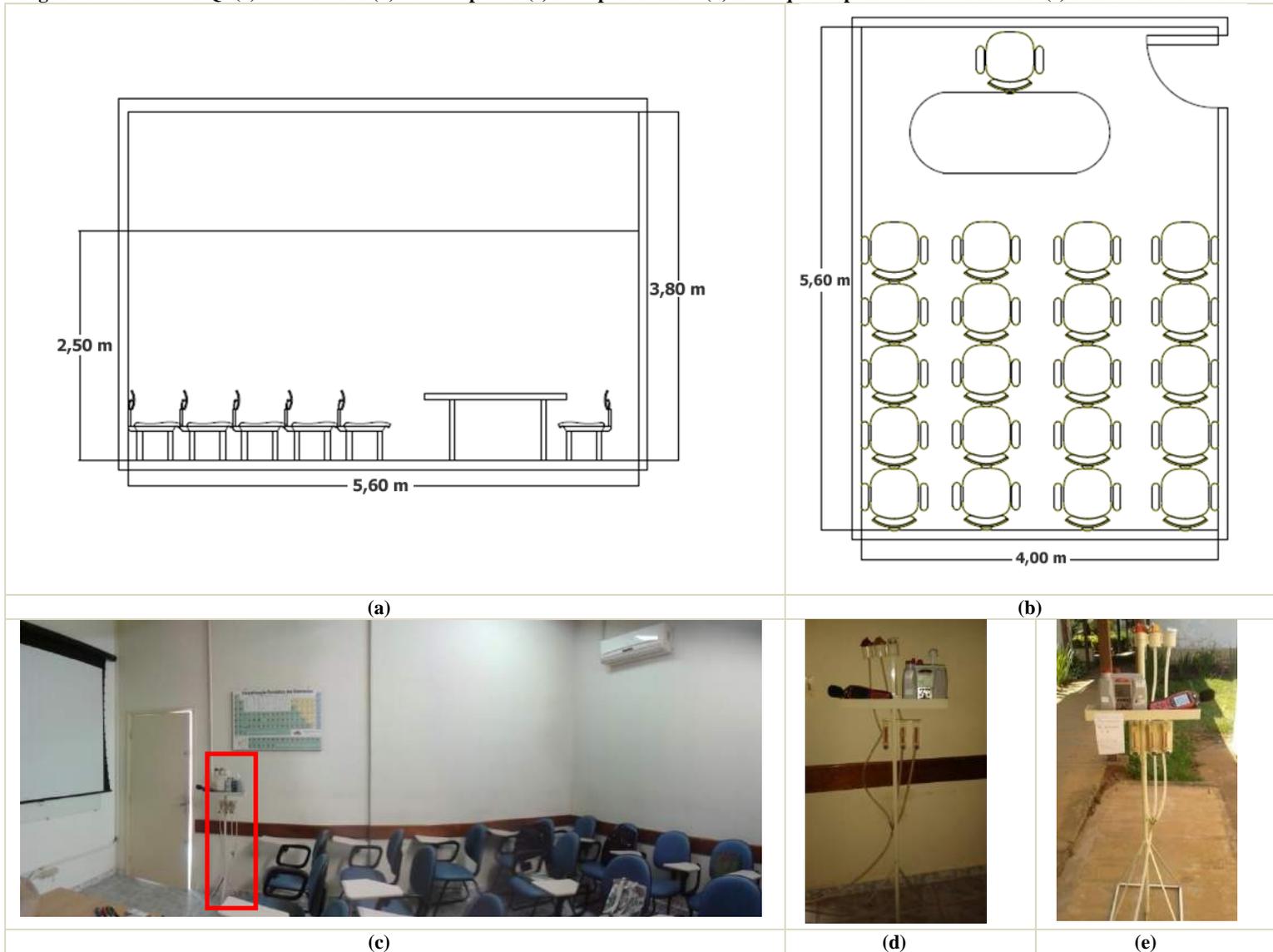
Figura 3 - Localização das salas de aula monitoradas próximas da BCo na área norte da UFSCar



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS, 2015.

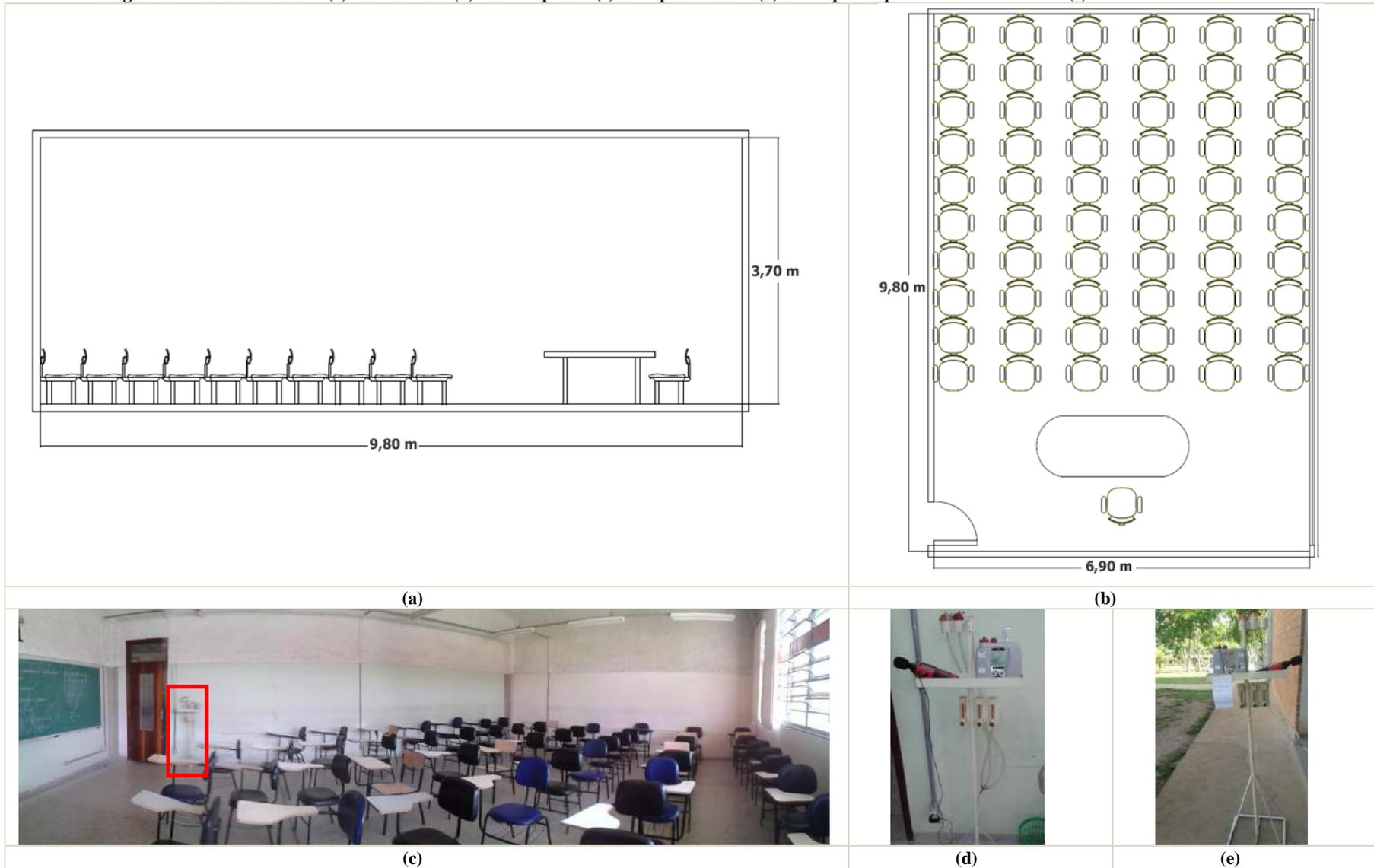
As salas de aula selecionadas encontram-se fotografadas e esquematizadas nas Figuras 4 (sala 3 - DQ), 5 (sala 102 - AT5), 6 (sala 76 - AT4) e 7 (sala D - DEQ), onde também são ilustrados os pontos amostrais externos, fixados nos pátios laterais das salas, que eram monitorados simultaneamente aos internos para critérios de comparação. Nestas figuras verifica-se que nas salas com ventilação natural havia lousas tradicionais de giz e as salas climatizadas possuíam quadros acrílicos.

Figura 4 - Sala 3 do DQ: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo



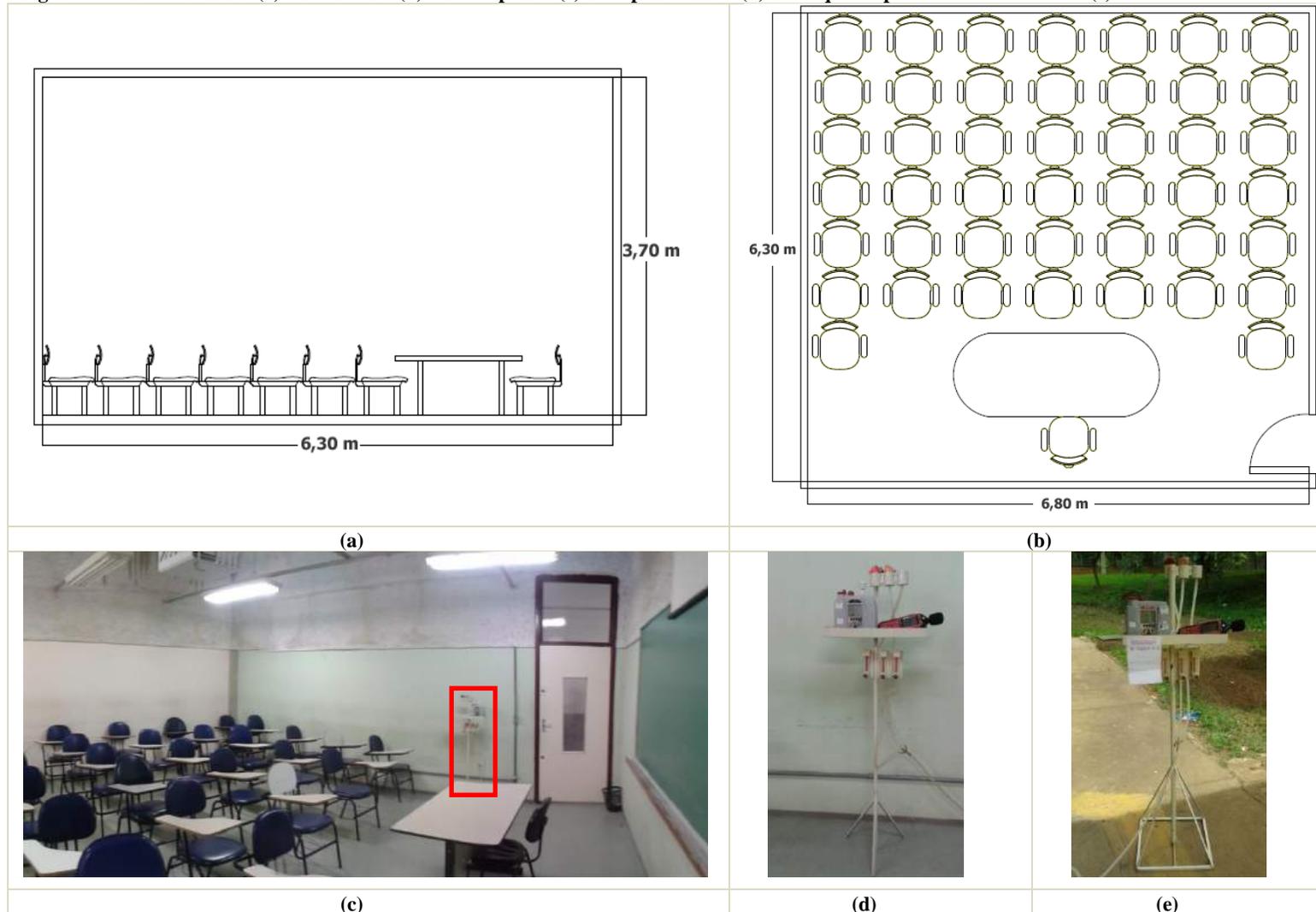
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 5 - Sala 102 do AT5: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo



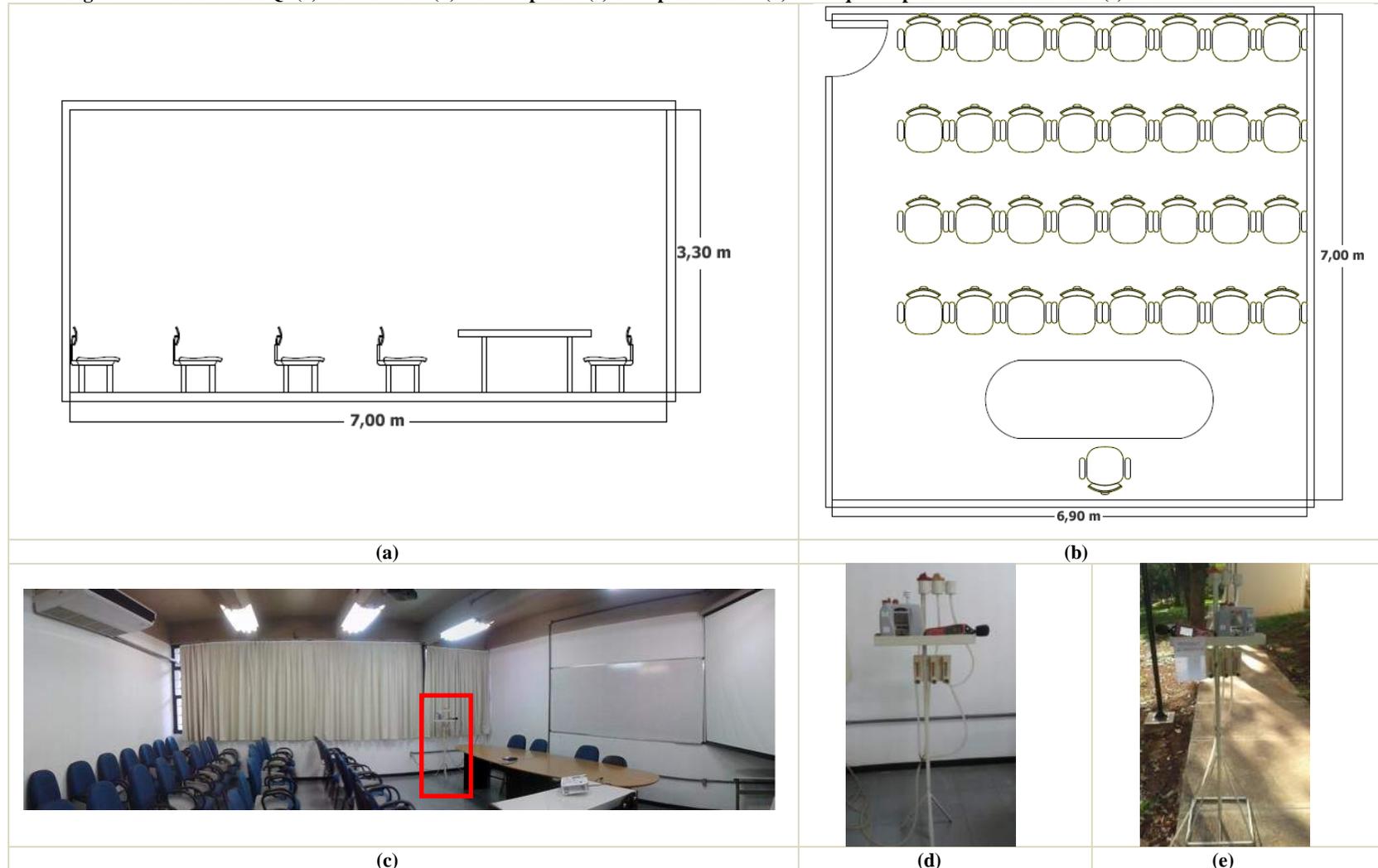
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 6 - Sala 76 do AT4: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 7 - Sala D do DEQ: (a) Vista lateral (b) Vista superior (c) Foto panorâmica (d) Destaque do ponto amostral interno (e) Ponto amostral externo



Fonte: Acervo pessoal.

No 2º semestre de 2014, entre os meses de setembro e dezembro, definiu-se que o monitoramento aconteceria duas vezes por semana, uma vez em sala de ventilação natural e a outra em sala com ar-condicionado e duraria das 08:00 às 12:00 e das 14:00 às 18:00, respeitando o horário normal de aulas. Foi decidido também que cada sala seria monitorada quatro vezes (uma vez por semana cada, durante quatro semanas) para verificar o comportamento dos parâmetros no decorrer do tempo. Estas decisões foram pautadas nas recomendações técnicas adotadas como referenciais e também por questões logísticas que incluem a anuência dos docentes para o monitoramento das salas durante as aulas.

As normas técnicas da RE 09/2003 da ANVISA orientam que, para monitoramento de interiores, quando a área construída possuir até 1.000 m² apenas um ponto amostral é necessário e este deve estar localizado na altura de 1,5 m do piso, no centro do ambiente ou em zona ocupada.

Como todas as salas monitoradas possuem área inferior a 1.000 m², apenas um ponto amostral foi necessário. A localização deles em cada sala está destacada nas Figuras 4-c, 5-c, 6-c e 7-c, sendo possível verificar que ficaram próximos a portas ou janelas, pois foi preconizado não prejudicar a vista da lousa pelos alunos e também devido à localização das tomadas, permitindo que a bomba de vácuo (imprescindível para o funcionamento do sistema de filtração) ficasse fora das salas para que seu ruído não incomodasse. Os equipamentos eram colocados sobre um suporte que possui aproximadamente 1,5 m de altura, mostrado em detalhe nas Figuras 4-d, 5-d, 6-d e 7-d (ver nas páginas anteriores).

4.2 Material particulado

Para a amostragem de material particulado adotou-se como base a Norma Técnica 004: “Qualidade do Ar Ambiental Interior. Método de Amostragem e Análise de Concentração de Aerodispersóides em Ambientes Interiores” da RE 09/2003 da ANVISA.

Foram utilizados sistemas de filtração, amostradores passivos para as frações MP_{2,5} e MP₁₀ (denominados PEM-2,5 e PEM-10) e cassetes plásticos para a coleta de MPT. Todos estes equipamentos, bem como, o preparo das membranas utilizadas na filtração do ar e as análises químicas posteriores serão descritos a seguir.

4.2.1 Preparo das membranas filtrantes

As membranas utilizadas como meio filtrante para a coleta de material particulado do ar foram da marca Pall, constituídas de PTFE (politetrafluoretileno, comercialmente conhecido como Teflon[®]), com diâmetro de 37 mm e diâmetro de poro de 2,0 µm.

O preparo destas membranas para as amostragens consistiu em mantê-las por, no mínimo, 24 horas em um dessecador para evitar a interferência da umidade do ar nas pesagens, que se realizaram antes e após o monitoramento ambiental, na microbalança da marca Mettler Toledo, modelo XP2U, com resolução de 0,1 µg (0,0000001 g), que conta com um eletrodo universal (marca Mettler Toledo) instalado para promover a eliminação de carga eletrostática acumulada nestas membranas. Elas eram passadas pelo eletrodo (com o auxílio de uma pinça de borda chata) e pesadas durante no mínimo três dias consecutivos até obter uma estabilização das massas com variação compreendida em $\pm 0,00002$ g (BRASIL, 2001).

Em cada ambiente monitorado eram utilizadas 6 membranas simultaneamente: duas para MP_{2,5} (uma interna e uma externa), duas para MP₁₀ e duas para MPT. Além destas selecionaram-se também membranas limpas para atuarem como “brancos” do procedimento experimental. O termo “branco de caixa” refere-se à membrana, proveniente da mesma caixa/lote das demais utilizadas, que foi mantida em dessecador por todo o período amostral, enquanto “branco de campo” designa a membrana que acompanhou o trajeto das coletas em suporte plástico fechado, mas não foi inserida nos sistemas de filtração usados, importante para averiguar se houve contaminação no trajeto, verificando a ocorrência de variações nas massas destas membranas e na composição química ao ser comparada com o branco de caixa.

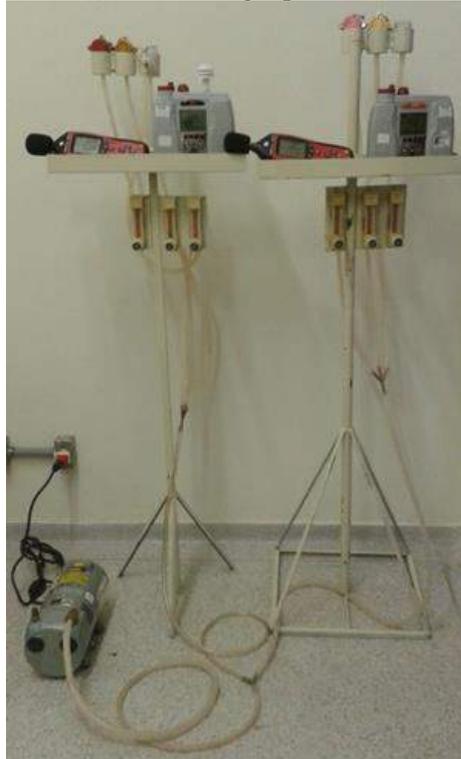
4.2.2 Sistema de filtração de ar e amostradores de MP

Para o monitoramento dos particulados foi construído um sistema para filtração do ar (ilustrado na Figura 8) composto por uma bomba de vácuo acoplada por mangueiras de silicone a dois suportes metálicos, de aproximadamente 1,5 m de altura, com três rotômetros cada. Um dos suportes era mantido dentro da sala em estudo e o outro externamente (os pontos amostrais foram anteriormente ilustrados nas Figuras 4, 5, 6 e 7) e aos rotômetros conectavam-se os amostradores para MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT onde eram inseridas as membranas previamente pesadas, fixando a vazão de ar em 600 L h⁻¹ em cada rotômetro (equivalente a 10 L min⁻¹, que é a vazão média da respiração humana).

Ao final das coletas, o volume total de ar filtrado no sistema era calculado pelo produto entre a vazão de ar e o tempo de amostragem. Assim, a concentração de MP podia ser obtida pela razão entre a massa de particulado acumulada (calculada pela subtração entre as massas final e inicial das membranas, procedimento conhecido como gravimetria) e o volume, multiplicada por 10⁶ para converter a unidade grama em micrograma, conforme a Equação 1.

$$C = \frac{(m_f - m_i)}{V} \cdot 10^6 \quad (1)$$

Figura 8 - Sistema de filtração para a coleta de MPT



Fonte: Acervo pessoal.

No sistema de filtração (Figura 8) há pequenos amostradores de particulados fixados no topo dos suportes metálicos conectados por mangueiras aos rotômetros. Para monitorar MPT a membrana foi inserida em um cassete plástico modelo 225-2LF (marca SKC) de 37 mm de diâmetro composto por duas peças, enquanto para avaliar as concentrações das frações MP_{10} e $MP_{2,5}$ foram utilizados equipamentos portáteis denominados *Personal Environmental Monitor* (PEM), da marca SKC, que consiste em um pequeno e leve dispositivo de amostragem pessoal composto por um impactador de fase única e um pós-filtro. Na Figura 9 estão ilustrados a membrana (cujo diâmetro foi comparado a uma régua), os equipamentos PEM-10, PEM-2,5 e o cassete plástico utilizado para monitorar MPT.

Figura 9 - (a) Membrana de Teflon (37 mm) (b) Cassete para MPT (c) PEM-10 (d) PEM-2,5

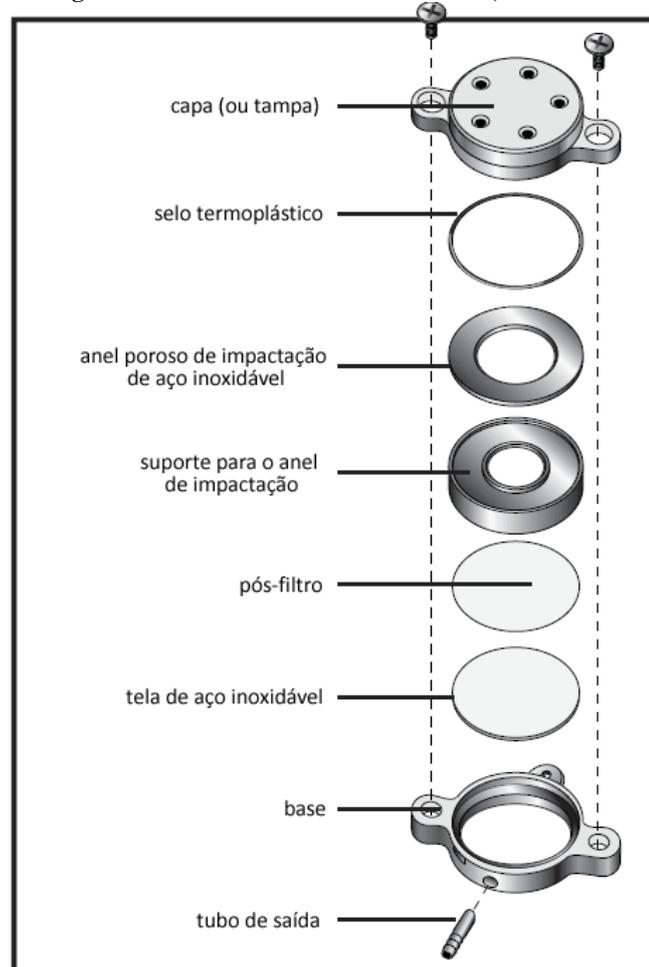


Fonte: Acervo pessoal.

Os PEM-2,5 e PEM-10 funcionam acoplados a uma bomba de vácuo e operam sobre o princípio da separação inercial de partículas no ar, assim, elas são recolhidas através do impactador removendo aquelas acima de 50% do ponto de corte de 2,5 ou 10 μm de diâmetro aerodinâmico, dependendo da fração desejada. As partículas maiores ficam retidas em um anel untado com óleo e posteriormente são descartadas, enquanto as partículas menores (abaixo dos 50% do ponto de corte) são coletadas nas membranas de PTFE (Teflon[®], material de baixo índice de retenção de vapores de água, para evitar higroscopia).

Os equipamentos do tipo PEM consistem em três partes principais: capa, conjunto do anel de impactação e base com pós-filtro, conforme ilustrado na Figura 10. Seu uso é indicado para monitoramento pessoal, devendo ser acoplado na lapela da pessoa e a uma bomba de vácuo portátil que circularia conjuntamente. Porém a bomba portátil é muito ruidosa e pesa 1,0 kg (suas dimensões, em cm, são: 20,0 x 10,0 x 7,0), impossibilitando solicitar que o professor ou um aluno de cada sala monitorada a utilizasse. Assim, optou-se por fixá-los nos suportes metálicos e utilizar apenas uma bomba de vácuo de alta potência, capaz de manter cada um dos rotômetros operando com a vazão constante de 600 L h⁻¹.

Figura 10 - Partes constituintes dos PEM-2,5 e PEM-10



Fonte: Adaptação de figura disponível em SKC, 2014.

4.2.3 Análises químicas por ICP-MS e ICP-OES

As membranas filtrantes foram utilizadas em uma primeira coleta, posteriormente foram pesadas para obtenção da concentração e então eram reutilizadas na coleta seguinte, tendo sido tomados todos os cuidados no armazenamento e transporte para evitar contaminação. Este procedimento foi adotado visando aumentar a massa do particulado retido para otimizar as análises químicas, pois cada membrana teria sido utilizada em média por 16 horas (8 horas/coleta). Assim, as membranas utilizadas na primeira quinzena de coleta de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT em cada ambiente monitorado foram selecionadas para análise através das técnicas de Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) e de Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) objetivando identificar e quantificar elementos químicos presentes (metais e ametais). Anteriormente às análises foi realizada extração ácida nestas membranas, procedimento que será descrito a seguir, ressaltando que todas estas etapas foram realizadas em laboratórios do Departamento de Química da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

4.2.3.1 Tratamento das membranas filtrantes: extração ácida

Para realizar a extração das membranas, inicialmente limpou-se o interior de uma capela de fluxo laminar, onde com o auxílio de luvas de látex manusearam-se as membranas que já haviam sido pesadas. Elas foram inseridas em tubos de polietileno de 50,0 mL (graduados e de fundo cônico) e acrescentou-se 3,0 mL de ácido nítrico bidestilado a cada tubo, prosseguindo com a inserção dos tubos em uma chapa de aquecimento onde foram mantidos por 4 horas a 100 °C, para fins de decomposição ácida (MATEUS, 2012).

Após este período, esperou-se que os extratos ácidos esfriassem a temperatura ambiente e acrescentaram-se 27,0 mL de água ultrapura fresca para a diluição necessária. Os tubos, então, foram centrifugados por cerca de 4 minutos (rotação de 2.000 rpm) para separação do material insolúvel (AMARAL, 2010; MATEUS, 2012). A partir deste extrato, as concentrações de metais e ametais puderam ser obtidas por ICP-MS e ICP-OES.

As membranas selecionadas para “branco de caixa” foram também tratadas, pois, após as análises por ICP, foram usadas para descontos nos cálculos amostrais, ou seja, a composição química dos brancos foi subtraída das composições obtidas nas membranas utilizadas nas coletas de MP, de modo que as concentrações de cada elemento identificado referiam-se apenas à composição do particulado retido. Também analisaram-se as membranas identificadas como “branco de campo” para verificar se houve contaminação nos trajetos até os locais de amostragem.

4.2.3.2 Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS)

Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado é uma técnica aplicada para análises multielementares em níveis de concentrações muito baixas (até a ordem de partes por trilhão, ppt), muito eficiente para a maioria dos elementos, pois as interferências espectrais são mínimas, visto que muitos elementos possuem um único pico no espectro de massa, ou seja, um único isótopo.

No equipamento, inicialmente o gás argônio (Ar) sofre uma descarga elétrica produzida por uma bobina que o faz ionizar permitindo a formação do plasma. Os íons e elétrons de argônio formados começam a interagir com o campo magnético ao redor da bobina de indução, assim eles se multiplicam e geram um plasma de alta temperatura que é responsável pela excitação ou ionização da maioria dos elementos químicos (SKOOG et al., 2006).

No analisador de massas do ICP-MS, os íons são separados de acordo com sua razão massa/carga (denotado por m/z). Este sistema funciona em alto vácuo e utiliza a aplicação de potenciais de radiofrequência (RF) e de corrente contínua (DC), ajustados para que apenas íons de determinada razão m/z desenvolvam uma trajetória estável e atinjam o detector (SKOOG et al., 2006).

Neste trabalho o equipamento utilizado foi o ICP-MS modelo DRC II (PerkinElmer-Sciex, EUA), cujas características e condições experimentais estão no Quadro 5.

Quadro 5 - Condições operacionais para ICP-MS utilizadas

Potência de radiofrequência	1.100 W
Vazão de argônio - Plasma	15,00 L min ⁻¹
Vazão de argônio - Auxiliar	1,00 L min ⁻¹
Vazão de argônio - Nebulizador	0,90 L min ⁻¹
Modo de leitura	<i>Peak Hopping</i>

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3.2.1 Calibração do ICP-MS e limites de detecção e quantificação

As soluções de calibração foram preparadas a partir das seguintes soluções estoques:

- *Multielementares:*

- Perkin Elmer 29 com concentração de 1.000 µg L⁻¹ (Elementos: Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, In, K, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Rb, Se, Na, Ag, Sr, Ti, V, U, Zn);

- Perkin Elmer 17 com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elementos: Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Sc, Tb, Th, Tm, Y, Yb);
- Perkin Elmer 12 com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elementos: B, Ge, Mo, Nb, P, Re, S, Si, Ta, Ti, W, Zr);
- PUC 5 com concentração de 10 mg L^{-1} (Elementos: Fe, Ca, K, Mg, Na).

- *Monoelementares:*

- Merck Titrisol com concentração de 500 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elemento: Au);
- Merck Titrisol com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elemento: Ti);
- Merck com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elemento: Hg);
- VHG labs com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elemento: Sb);
- VHG labs com concentração de 1.000 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Elemento: Sn).

As concentrações da curva analítica variaram de 50 $\mu\text{g L}^{-1}$ a 100 $\mu\text{g L}^{-1}$, e o padrão interno de calibração foi uma solução de Rh (ródio) com concentração de 400 $\mu\text{g L}^{-1}$ a 1% de HNO_3 . Nestas soluções de calibração foram acrescentados 100 μL de ácido nítrico, para evitar a precipitação dos padrões, pois a matriz da curva é aquosa.

Os elementos químicos, respectivas massas atômicas (MA), coeficientes de linearidade (R^2), os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) estão apresentados na Tabela 1. As Equações 2 e 3 foram utilizadas, respectivamente, no cálculo dos limites de detecção (que refere-se à menor concentração do analito que pode ser detectada) e de quantificação (que é a menor concentração do analito que pode ser determinada com um nível de incerteza aceitável), onde “DP” representa o desvio padrão amostral da concentração de cada analito calculado após 10 leituras do “branco” da curva de calibração (água ultrapura acidificada com HNO_3 , com os dados de concentração originalmente processados na unidade $\mu\text{g L}^{-1}$), e “S” representa o coeficiente angular (“inclinação”) da equação da reta obtido para cada analito. Os valores utilizados nas equações para DP e S também encontram-se na Tabela 1.

$$LD = 3 \cdot \frac{DP}{S} \quad (2)$$

$$LQ = 10 \cdot \frac{DP}{S} \quad \text{ou} \quad LQ = 3,3 \cdot LD \quad (3)$$

Tabela 1 - Parâmetros analíticos obtidos para a técnica de ICP-MS

Símbolo	Elemento	MA	R ²	DP	S	LD (ng L ⁻¹)	LQ (ng L ⁻¹)
Li	Lítio	7	1,0000	0,000019	0,0027	21,00	69,00
Be	Berílio	9	0,9998	0,0000060	0,00055	32,51	108,36
Na	Sódio	23	0,9997	0,016	0,014	3378,00	11261,00
Mg	Magnésio	24	0,9997	0,0011	0,0083	393,00	1311,00
Al	Alumínio	27	0,9989	0,026	0,014	5518,00	18393,00
K	Potássio	39	0,9990	0,023	0,015	4555,00	15183,00
Ca	Cálcio	43	1,0000	0,00046	0,00010	27098,00	90326,00
Sc	Escândio	45	0,9981	0,00059	0,019	95,61	318,71
Ti	Titânio	47	0,9998	0,000044	0,0014	95,00	315,00
V	Vanádio	51	0,9994	0,00015	0,018	24,00	81,00
Cr	Cromo	53	0,9986	0,000070	0,0017	125,37	417,90
Mn	Manganês	55	0,9998	0,00032	0,024	41,00	136,00
Fe	Ferro	57	0,9998	0,0012	0,00040	8440,00	28134,00
Co	Cobalto	59	0,9999	0,000041	0,018	6,82	22,74
Ni	Níquel	60	0,9995	0,000027	0,0036	23,00	76,00
Cu	Cobre	65	0,9995	0,000077	0,0038	61,00	203,00
Zn	Zinco	66	0,9988	0,00023	0,0015	448,00	1493,00
Ga	Gálio	69	0,9992	0,000041	0,015	8,00	27,00
Ge	Germânio	72	0,9999	0,000069	0,0038	55,00	183,00
As	Arsênio	75	0,9998	0,000019	0,0018	32,00	106,00
Se	Selênio	82	0,9996	0,000039	0,00020	640,00	2133,00
Rb	Rubídio	85	0,9995	0,00012	0,028	13,00	44,00
Sr	Estrôncio	88	0,9995	0,00080	0,035	69,00	229,00
Y	Ítrio	89	0,9999	0,000041	0,036	3,00	12,00
Zr	Zircônio	90	0,9999	0,00010	0,017	18,00	61,00
Nb	Nióbio	93	0,9998	0,000062	0,029	6,00	21,00
Mo	Molibdênio	95	0,9999	0,000019	0,0049	11,00	38,00
Ag	Prata	107	0,9989	0,000019	0,015	4,00	13,00
Cd	Cádmio	114	0,9993	0,000013	0,0080	5,00	16,00
In	Índio	115	0,9996	0,00014	0,056	7,56	25,21
Sn	Estanho	119	1,0000	0,000035	0,0042	25,00	85,00
Sb	Antimônio	121	0,9995	0,000022	0,0093	7,00	23,00
Cs	Césio	133	0,9996	0,000040	0,052	2,00	8,00
Ba	Bário	137	0,9998	0,000080	0,0061	39,00	130,00
La	Lantânio	139	0,9998	0,000038	0,049	2,00	8,00
Ce	Cério	140	0,9999	0,000043	0,042	3,00	10,00
Pr	Praseodímio	141	0,9997	0,000027	0,051	2,00	5,00
Nd	Neodímio	143	0,9994	0,000018	0,0062	9,00	30,00
Sm	Samário	147	0,9998	0,000012	0,0079	4,00	15,00
Eu	Európio	151	0,9998	0,000011	0,026	1,00	4,00
Gd	Gadolínio	157	0,9997	0,000010	0,0092	3,00	11,00
Tb	Térbio	159	0,9996	0,000013	0,057	1,00	2,00
Dy	Disprósio	163	0,9997	0,000019	0,013	4,00	15,00
Ho	Hólmio	165	0,9998	0,000019	0,054	1,00	4,00
Er	Érbio	166	0,9995	0,000012	0,017	2,00	7,00
Tm	Túlio	169	0,9996	0,000018	0,056	1,00	3,00
Yb	Ítérbio	173	0,9996	0,000012	0,010	3,00	12,00
Lu	Lutécio	175	0,9997	0,000016	0,059	1,00	3,00
Ta	Tântalo	181	0,9999	0,000034	0,049	2,07	6,88
W	Tungstênio	182	0,9997	0,000025	0,012	6,00	21,00
Re	Rênio	185	0,9999	0,000012	0,019	1,91	6,37
Au	Ouro	197	0,9996	0,000019	0,0040	14,00	48,00
Hg	Mercúrio	202	0,9999	0,000033	0,0026	37,56	125,21
Tl	Tálio	205	0,9993	0,000027	0,039	2,00	7,00
Pb	Chumbo	208	0,9998	0,00028	0,026	32,00	106,00
Bi	Bismuto	209	0,9993	0,000034	0,039	3,00	9,00
Th	Tório	232	0,9998	0,000075	0,047	5,00	16,00
U	Urânio	238	0,9996	0,000060	0,054	3,00	11,00

Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3.3 Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES)

ICP-OES é uma técnica multielementar que permite determinações rápidas de elementos químicos em diversas matrizes. Comparado a outros métodos espectroscópicos, apresenta vantagem em relação à determinação de elementos formadores de óxidos refratários.

O princípio de funcionamento é a medida de intensidade da radiação emitida por um íon excitado pelo plasma, quando retorna ao seu estado fundamental (SKOOG et al., 2006). No equipamento, as medições da radiação de emissão podem ser observadas no modo vertical (configuração radial) ou horizontal (configuração axial), modo de maior sensibilidade.

Neste trabalho, utilizou-se o equipamento de ICP-OES modelo Optima 7300 DV (Perkin Elmer, EUA), cujas condições operacionais estão listadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Condições operacionais para ICP-OES utilizadas

Potência de radiofrequência	1.400 W
Vazão de argônio - Plasma	15,00 L min ⁻¹
Vazão de argônio - Auxiliar	1,00 L min ⁻¹
Vazão de argônio - Nebulizador	0,60 L min ⁻¹
Configuração para análises	Axial

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3.3.1 Calibração do ICP-OES e limites de detecção e quantificação

As soluções que permitiram a obtenção das curvas analíticas foram preparadas utilizando as soluções padrões a seguir:

- *Multielementares:*

- Centipur Multielement Standard IV com concentração de 1.000 mg L⁻¹ (Elementos: Ag, Al, B, Ba, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, In, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Tl, Zn)
- Qhemis G9V – ICP com concentração de 100 mg L⁻¹ (Elementos: As, Be, Li, Mo, Sb, Se, Sn, Ti, P, V)

- *Monoelementares:*

- Qhemis com concentração de 1.000 mg L⁻¹ (Elemento: S)
- Qhemis com concentração de 1.000 mg L⁻¹ (Elemento: P)

Inicialmente elencaram-se 20 elementos para quantificação (Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, V, Zn), porém como a técnica de ICP-OES seria usada conjuntamente com a técnica de ICP-MS, focou-se apenas nos metais alcalinos, alcalinos terrosos, alumínio, fósforo e enxofre, pois estes sofrem menos interferências e são melhor quantificados pela emissão ótica. Assim, os principais elementos, linhas espectrais (λ), coeficiente de determinação (R^2), os limites de detecção (LD, também calculados pela Equação 2) e quantificação (LQ, ver Equação 3) estão apresentados na Tabela 2, onde também se encontram os valores utilizados nas equações para DP (desvio padrão amostral) e S (coeficiente angular). É importante destacar que todas as medidas foram efetuadas no modo axial para aumentar a sensibilidade na detecção dos analitos.

Tabela 2 - Parâmetros analíticos obtidos para a técnica de ICP-OES

Elemento	λ (nm)	Tipo de Linhas	R^2	DP	S	LD (ng L ⁻¹)	LQ (ng L ⁻¹)
Al	396,153	I (atômica)	0,9999	36,96	65370	1696,19	5597,43
Ca	422,673	I (atômica)	0,9998	23,92	474500	151,23	499,07
Fe	259,939	II (iônica)	0,9994	30,53	74790	1224,63	4041,28
K	766,490	I (atômica)	0,9999	52,36	189600	828,48	2733,99
Mg	280,271	II (iônica)	0,9999	27,95	1425000	58,84	194,18
Na	589,582	I (atômica)	0,9999	66,26	228200	871,08	2874,56
Sr	421,552	II (iônica)	0,9999	125,32	4569000	82,28	271,54
S	180,669	I (atômica)	0,9999	8,00	936	25641,03	84615,38

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Temperatura e umidade

Para coletar os dados referentes à temperatura e umidade relativa do ar foi utilizada como base a Norma Técnica 003 da RE 09/2003 da ANVISA, que recomenda a utilização de um amostrador de leitura direta, do tipo termo-higrômetro com faixa de temperatura de 0 °C a 70 °C e umidade de 5% a 95%. Cabe ressaltar que o número de pontos de amostras de ar interior foi estipulado com base na área construída e resultou em apenas um ponto, conforme previamente citado no texto (ver subseção 4.1).

Utilizaram-se dois equipamentos denominados Monitor de Qualidade Interna do Ar com sensor de CO e coletor de partículas modelo EVM-7, da marca Quest, que

consistem em instrumentos portáteis, indicados para monitoramento de ambientes fechados, capazes de monitorar simultaneamente níveis de temperatura, umidade relativa do ar, concentrações de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis totais (COVs) e material particulado (MP_{2,5}; MP₁₀ ou MPT). Para cada parâmetro monitorado apresenta uma metodologia específica, e por ser do tipo *datalogger* (armazenam os dados de todos os parâmetros), as informações podem ser descarregadas em computador por intermédio do *software* do equipamento.

Durante as amostragens, um dos EVM-7 era mantido no interior da sala em estudo enquanto o outro era fixado externamente e para os parâmetros temperatura e umidade relativa, as faixas de medição foram, respectivamente, de 0 a 70 °C (resolução de 0,1 °C e precisão/repetibilidade de $\pm 1,1$ °C) e entre 0 e 100% (resolução de 0,1 e precisão/repetibilidade de $\pm 5\%$).

Para monitorar a temperatura, o equipamento utiliza um sensor de junção de diodos, que possui uma região de equilíbrio pela recombinação de cargas positivas e negativas, denominada de região de depleção, que possui uma barreira de potencial. Basicamente, o princípio de funcionamento baseia-se na resistência elétrica de um material variar com a temperatura.

Para monitorar a umidade relativa, o EVM-7 utiliza um sensor capacitivo, que consiste em um substrato cerâmico sobre o qual uma fina película de polímero é depositada entre dois eletrodos condutores. A superfície de detecção é revestida com um eletrodo metálico microporoso, permitindo ao polímero absorver umidade, protegendo-o da contaminação e exposição ao fenômeno de condensação. À medida que o polímero absorve água, as mudanças nas constantes dielétricas são incrementadas e essa variação é quase diretamente proporcional à umidade relativa do meio ambiente circundante. Assim, através do monitoramento da mudança na capacitância, o nível de umidade relativa pode ser obtido (INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY, 2014).

4.4 Dióxido e monóxido de carbono (CO₂ e CO) e compostos orgânicos voláteis (COVs)

Para o monitoramento de dióxido de carbono (CO₂) a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) indica a utilização da Norma Técnica 002 da RE 09/2003 da ANVISA, intitulada “Qualidade do Ar Ambiental Interior. Método de Amostragem e Análise da Concentração de Dióxido de Carbono em

Ambientes Interiores”, que recomenda o uso de um equipamento de leitura direta por meio de sensor infravermelho não dispersivo, para uma faixa de concentração de 0 a 5.000 ppm.

Para o monitoramento da concentração de dióxido e de monóxido de carbono (CO₂ e CO), bem como para os compostos orgânicos voláteis totais (COVs) foram também utilizados os amostradores EVM-7 (citados na subseção 4.3).

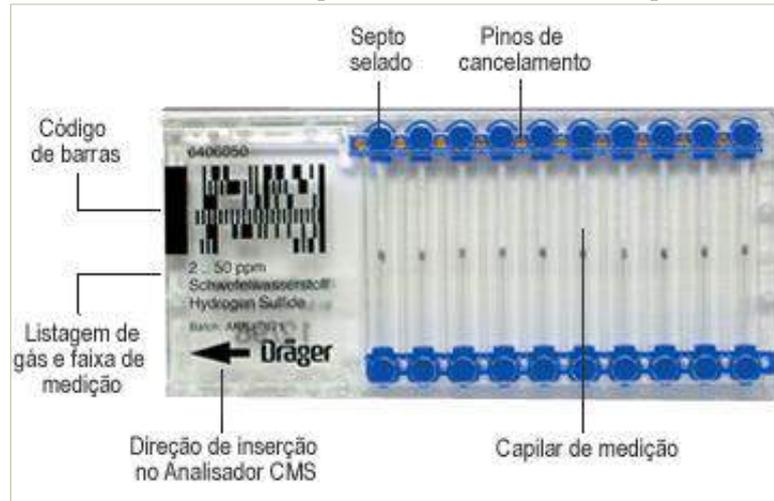
Para monitorar as concentrações de gases, o EVM-7 usa uma metodologia bem diferente daquela descrita para temperatura e umidade. Ele possui um sensor inteligente que reconhece automaticamente os gases e pode medir até três simultaneamente, entre CO₂, gases tóxicos, derivados de combustíveis e compostos orgânicos voláteis. O CO₂ é detectado por infravermelho não dispersivo, na faixa de detecção de 0 a 20.000 ppm (resolução de 1 ppm, precisão/repetibilidade de ± 100 ppm a 20 °C), o CO é analisado por um sensor eletroquímico, detectando entre 0 e 1.000 ppm (resolução de 1 ppm, precisão/repetibilidade de 5%), enquanto a concentração de COVs totais é obtida por fotoionização, numa escala de 0 a 2.000 ppm (resolução de 0,01 ppm, precisão/repetibilidade de $\pm 5\%$). Todas as leituras destes dados são armazenadas a cada 30 segundos.

É importante mencionar que para uma melhor atuação do EVM-7 na detecção de COVs recomenda-se calibrar o equipamento utilizando um fator de correção (indicado no manual do equipamento) relativo aos principais compostos que se pretende medir.

Na literatura específica para qualidade do ar de interiores, devido à reatividade com os COVs presentes no ar ambiente, recomenda-se monitorar ozônio, que é um composto inorgânico. Assim, como o equipamento EVM-7 só armazena a concentração de COVs totais, optou-se por utilizar uma metodologia adicional para contemplar o ozônio. Foi utilizado o analisador CMS (*Chip Measurement System*) da marca Dräger, que é um sistema de monitoramento por *chip*, onde cada *chip* possui 10 capilares preenchidos com reagentes específicos de acordo com o composto monitorado. O equipamento possui um sistema de bombeamento que succiona o ar, introduzindo-o dentro do capilar, onde ocorre a reação entre o composto presente no ar e o reagente específico do capilar, gerando resultados pontuais numa medição óptico-elétrica realizada pelo analisador.

As partes constituintes do *chip* que o amostrador CMS utiliza são septo selado, pinos de cancelamento, capilar de medição e código de barras, que estão ilustradas na Figura 11. Foi aplicado no monitoramento de ozônio com faixa de detecção de 25 a 1.000 ppb e também como metodologia adicional para o monóxido de carbono, detectando entre 5 e 150 ppm.

Figura 11 - Partes constituintes do chip utilizado no amostrador CMS para monitorar gases



Fonte: Elaborada pela autora.

4.5 Taxas de ocupação e de ventilação

A norma adotada como referencial para os valores de taxa de ocupação e ventilação foi a RN 02/2003 da ABRAVA que estipula como ideal em salas de aula 50 pessoas a cada 100 m² (2 m²/pessoa) e 7,5 L s⁻¹ por pessoa como a vazão mínima de ar.

Para determinar a taxa de ocupação, deve-se calcular o quociente entre a área construída e o número de ocupantes do local e no que tange a taxa de ventilação, a norma não disponibiliza parâmetros detalhados de como deve ser feita sua determinação, apenas apresenta o valor recomendado para cada tipo de ambiente interno. Assim, optou-se por realizar um experimento análogo ao desenvolvido por Nascimento (2011), que se baseou na metodologia descrita por Heinsohn e Cimballa (2003) para, através da vazão de ar afluyente, por intermédio da configuração de um balanço de massa, determinar a vazão de ar que circula pela sala de aula.

Para fundamentar o experimento de taxa de ventilação, inicialmente deve-se caracterizar o problema a partir das variáveis existentes: volume do local considerado, concentração de CO₂ e vazão de ar, permitindo configurar um balanço de massa que possibilite determinar a vazão de ar que circula pela sala de aula.

Assim, pode-se simular um problema no qual a concentração de CO₂ seja elevada utilizando um cilindro de gás carbônico puro e, então, obter-se um perfil do comportamento desta concentração ao longo do tempo através do monitoramento com o equipamento EVM-7 (ver descrição na subseção 4.4). Desta forma, a partir do volume da sala

de aula monitorada e do perfil da concentração de CO₂ obtido, a vazão de ar no ambiente pode resultar de uma equação proveniente de um balanço de massa.

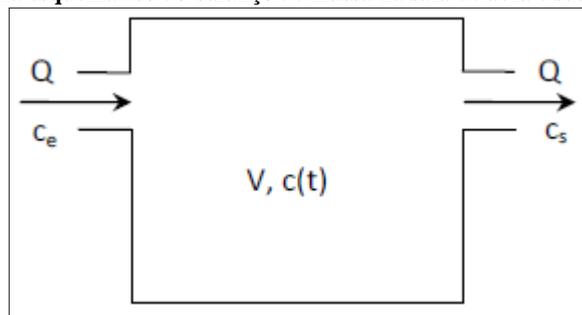
Para montar a equação de determinação da vazão de ar, é importante que se faça algumas suposições para a estruturação do balanço de massa, que estão listadas a seguir:

- a concentração no interior na sala de aula está igualmente distribuída em todo o ambiente e é a mesma da porção de saída;
- o volume da sala de aula é fixo;
- não há fonte de emissão de CO₂ no interior da sala de aula vazia;
- dentro e fora das salas de aula, a densidade do ar possui o mesmo valor e é constante;
- a vazão de entrada do ar é igual à de saída.

Sendo assim, a equação para determinação da vazão de ar na situação proposta pode ser estimada a partir do esquema na Figura 12, onde:

- Q: vazão de ar na entrada e na saída do sistema;
- c_e: concentração de CO₂ no ar exterior de entrada;
- c(t): concentração de CO₂ em função do tempo;
- c_s: concentração de CO₂ na corrente de saída de ar;
- V: volume da sala de aula.

Figura 12 - Diagrama esquemático do balanço de massa na sala de aula e suas principais variáveis



Fonte: NASCIMENTO, 2011.

Como se considera o volume da sala de aula constante e que a concentração de CO₂ interna está igualmente distribuída, a concentração do gás na corrente de saída, c_s, é a mesma que a encontrada no interior da sala variando ao longo do tempo, c(t). Portanto, a partir do balanço de massa com o volume da sala sendo constante, pode-se obter a Equação 4:

$$\frac{d(Vc)}{dt} = V \frac{dc}{dt} = Qc_e - Qc_s \quad (4)$$

Como c_s varia em função do tempo, ele passa a ser chamado de $c(t)$ e a Equação 8 surge a partir da integração da Equação 4 no intervalo de tempo, t , considerando a concentração de CO_2 em cada período de análise.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q}{V} (c_e - c) \quad (5)$$

$$\int_{c_0}^{c_t} \frac{1}{(c_e - c)} \cdot dc = \int_0^t \frac{Q}{V} \cdot dt \quad (6)$$

$$-\ln \left(\frac{c_e - c_t}{c_e - c_0} \right) = \frac{Q}{V} \cdot t \quad (7)$$

$$Q = \frac{V}{t} \cdot -\ln \left(\frac{c_e - c_t}{c_e - c_0} \right) \quad (8)$$

Assim, a partir da Equação 8, a taxa de ventilação para a sala pode ser obtida com a determinação da vazão de ar que entra e, posteriormente, comparada com valores estipulados pela ABRAVA.

4.6 Ruídos

Foram adotadas as NBR 10151 e 10152 da ABNT para nortear o monitoramento de ruídos e elas recomendam que as medições em interiores sejam realizadas nas condições normais de utilização do ambiente, ou seja, respeitando a rotina do local. Orienta também que seja utilizado um equipamento que meça o nível de pressão sonora equivalente ponderado em “A”, expresso em dBA, escala considerada adequada para representar a resposta humana para sons de aproximadamente 55 dB.

Assim, optou-se pela utilização de um decibelímetro digital, marca Instrutherm, modelo DEC-490, fixando a faixa de medição de 30 a 130 decibéis (resolução de 0,1 dB e precisão de $\pm 1,4$ dB), com os dados armazenados em dBA. Posteriormente, eles foram descarregados em computador utilizando o *software* do modelo DEC-490.

4.7 Análises e ferramentas estatísticas

Para o tratamento dos dados foram utilizadas ferramentas estatísticas como *boxplot*, coeficiente de correlação cruzada e p-valor que serão descritas nesta subseção.

4.7.1 Boxplot (gráfico de caixa)

O *boxplot* (gráfico de caixa, também grafado como *box-plot* ou *box plot*) é um tipo de gráfico utilizado para avaliar a distribuição empírica de um conjunto de dados (ESTATCAMP, 2014), especialmente indicado quando há uma grande oscilação entre os valores, pois auxilia na visualização de uma distribuição assimétrica. Apresenta o intervalo dos 50% de valores centrais de um rol de dados, a mediana, a amplitude e os valores anômalos, fornecendo informações sobre a dispersão das medidas, apresentando os pontos extremos e valores denominados “*outliers*” (“atípicos”).

Para interpretar um *boxplot* é importante recordar brevemente o importante conceito estatístico de separatriz que é uma medida estatística de tendência central. Inicialmente o rol de dados em estudo deve ser organizado em ordem crescente e então definir se o tipo de separatriz, que dividirá este rol em partes iguais, será quartis (4 partes iguais), decis (10 partes) ou percentis (100 partes). No caso deste tipo de gráfico, utilizam-se os quartis que são representados por Q_1 , Q_2 e Q_3 , onde:

- Q_1 : 1º quartil, indica que 25% da amostra possui valores inferiores ou iguais ao de Q_1 (consequentemente 75% está acima deste valor).
- Q_2 : 2º quartil, ou mediana, indica a posição central do rol, ou seja, 50% da distribuição está acima deste valor e 50% está abaixo.
- Q_3 : 3º quartil, indica que 75% da amostra possui valores inferiores ou iguais ao de Q_3 (consequentemente 25% está acima deste valor).

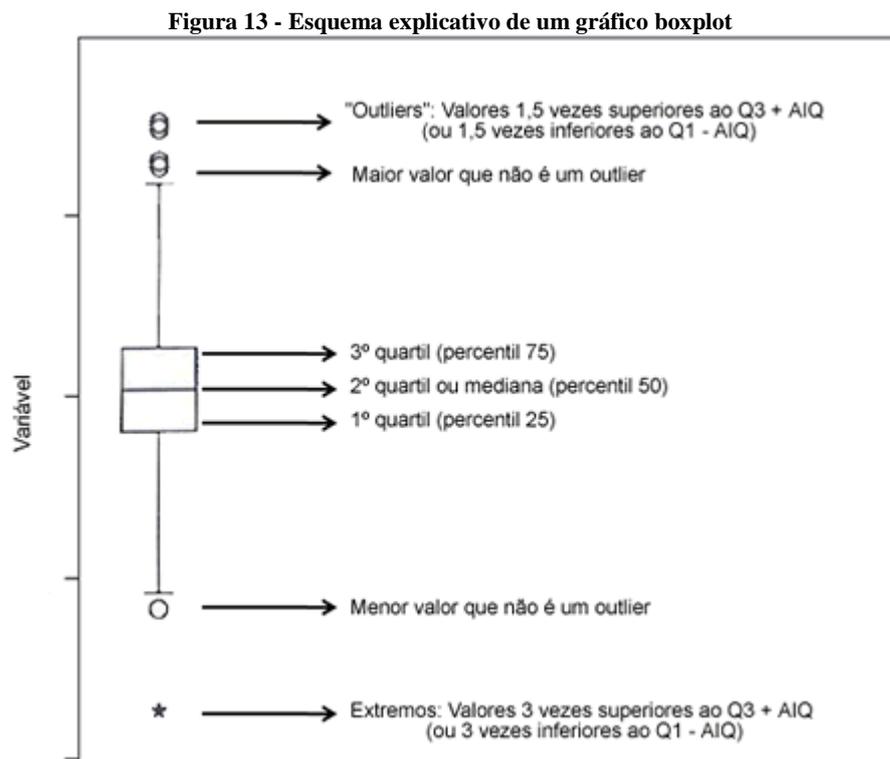
Graficamente, um *boxplot* é representado por um retângulo, cuja altura é determinada pelo primeiro e terceiro quartil e que é dividido pela mediana, alinhado verticalmente com dois segmentos de reta que representam os limites inferior e superior. Os dados situados entre o Q_3 e o final do segmento de reta (cauda) acima do retângulo (limite superior, LS), determinam o conjunto de valores máximos dos dados sem os valores extremos, ou seja, o alcance. Já os dados que estão entre Q_1 e a cauda inferior (limite inferior, LI) representa os valores mínimos do conjunto de dados. Os pontos situados acima do limite superior ou abaixo do limite inferior são considerados pontos extremos ou *outliers* (MORETTIN; BUSSAB, 2002; POZZA, 2005). As caudas que aparecem em um *boxplot* são calculadas pelas Equações 9 e 10:

$$LS = Q_3 + (1,5) * (Q_3 - Q_1) \quad (9)$$

$$LI = Q_1 - (1,5) * (Q_3 - Q_1) \quad (10)$$

Assim, em um *boxplot*, a posição central é dada pela mediana e a dispersão por $Q_3 - Q_1$, sendo esta subtração conhecida como amplitude interquartílica (AIQ). As posições relativas de Q_1 , Q_2 e Q_3 dão uma noção da assimetria da distribuição, ou seja, quanto mais central estiver Q_2 , mais simétrico será o conjunto de dados analisados.

A Figura 13 traz um esquema com todas as informações estatísticas representadas por um *boxplot*.



Fonte: MAROCO, 2003.

4.7.2 Coeficiente de correlação cruzada

O coeficiente de correlação cruzada é comumente utilizado em estudos de monitoramento ambiental, pois permite verificar como duas séries de dados, independentemente medidas, se comportam no decorrer do tempo, ou seja, como elas se relacionam, se o aumento ou redução em uma das séries de dados acompanha a variação da outra. Segundo Samohyl (2015) “esta relação entre duas variáveis não é necessariamente contemporânea, ou seja, dada a variação em uma variável, a outra poderá somente se modificar certo período mais tarde”, portanto pode ocorrer uma defasagem de tempo entre as alterações dos dados.

O coeficiente de correlação cruzada representado por “ r ” também chamado de coeficiente de correlação de Pearson (EHLERS, 2003), apresenta valores entre -1 e 1, sendo calculado pela Equação 11, onde x e y representam as variáveis correlacionadas, sendo x_i e y_i os valores individuais enquanto \bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

A obtenção de valores de r próximos de 0 indicam uma relação linear muito fraca e a intensidade da relação linear cresce à medida que r se afasta de 0 em direção a -1 ou 1 (MOORE, 2005). Valores negativos indicam que as variáveis (ou séries de dados) correlacionadas movem-se em sentidos contrários, ou seja, quando uma tende a aumentar a outra tende a diminuir, enquanto valores positivos são indícios de que as variáveis tendem a mover-se no mesmo sentido.

Para ter relevância estatística, apenas o valor do coeficiente de correlação cruzada não é suficiente para garantir um nível desejado de significância, portanto recomenda-se analisá-lo conjuntamente ao “p-valor”, que será descrito a seguir.

4.7.3 P-valor

O p-valor, também denominado nível descritivo do teste, é a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação a um valor observado, indicando se deverá ser rejeitado ou não (ESTATCAMP, 2015). De um modo simplificado, pode-se dizer que se o p-valor é menor ou igual ao nível de significância pré-determinado, significa que há correlação significativa entre as variáveis; caso contrário, não haverá associação entre elas.

Para a validação estatística das matrizes de correlação cruzada deste trabalho, o nível de significância adotado foi de 5% (que implica em um nível de confiança de 95%), ou seja, ao verificar a matriz correlata de p-valores, os valores acima de 0,05 indicam irrelevância estatística, assim os correspondentes coeficientes de correlação podem ser desconsiderados.

Para estas análises estatísticas foram utilizados a linguagem ambiente para computação estatística e gráfica denominada “R”, distribuída sob Licença Pública Geral, e o sistema estatístico ActionStat conjuntamente ao aplicativo Microsoft Excel[®] do pacote Office da Microsoft.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro semestre de 2014 foram realizados testes preliminares que apontaram a necessidade de algumas adequações metodológicas. Assim, apenas no final de setembro de 2014 foi iniciado efetivamente o estudo e as avaliações da qualidade do ar se realizaram às segundas-feiras na sala 3 do DQ (possuía ar-condicionado) e às quartas-feiras na sala 102 do AT5 (ventilação natural) durante quatro semanas, avaliando também os respectivos ambientes externos. Posteriormente monitorou-se às terças-feiras a sala 76 do AT4 (ventilação natural) e às quintas-feiras a sala D do DEQ (ar-condicionado), também por quatro semanas e com os exteriores avaliados. Assim, efetuaram-se quatro coletas em cada ambiente nas seguintes datas:

- sala 3 do DQ: 29/09/14, 06/10/14, 13/10/14 e 27/10/14;
- sala 102 do AT5: 01/10/14, 08/10/14, 15/10/14 e 29/10/14;
- sala 76 do AT4: 11/11/14, 18/11/14, 25/11/14 e 02/12/14;
- sala D do DEQ: 13/11/14, 20/11/14, 27/11/14 e 04/12/14.

Os resultados de cada parâmetro avaliado (MP_{2,5}, MP₁₀, MPT, temperatura, umidade, CO₂, CO, COVs, taxas de ocupação e de ventilação e ruídos) serão apresentados a seguir.

5.1 Material particulado

As concentrações obtidas para as frações de particulados amostradas, sua comparação com os padrões de emissão adotados, correlação com os índices de precipitação pluviométrica, bem como, os resultados das análises da composição química e as possíveis fontes emissoras serão os temas abordados nesta subseção.

5.1.1 Concentrações de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT

Utilizando a metodologia descrita na subseção 4.2 foi possível calcular as concentrações de material particulado e também os índices I/E (razão entre as concentrações internas e externas). A Tabela 3 traz as concentrações de todas as frações de particulados e as Figuras 14, 15 e 16, ilustram, respectivamente, as concentrações de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT, comparando-as com os limites adotados como referenciais.

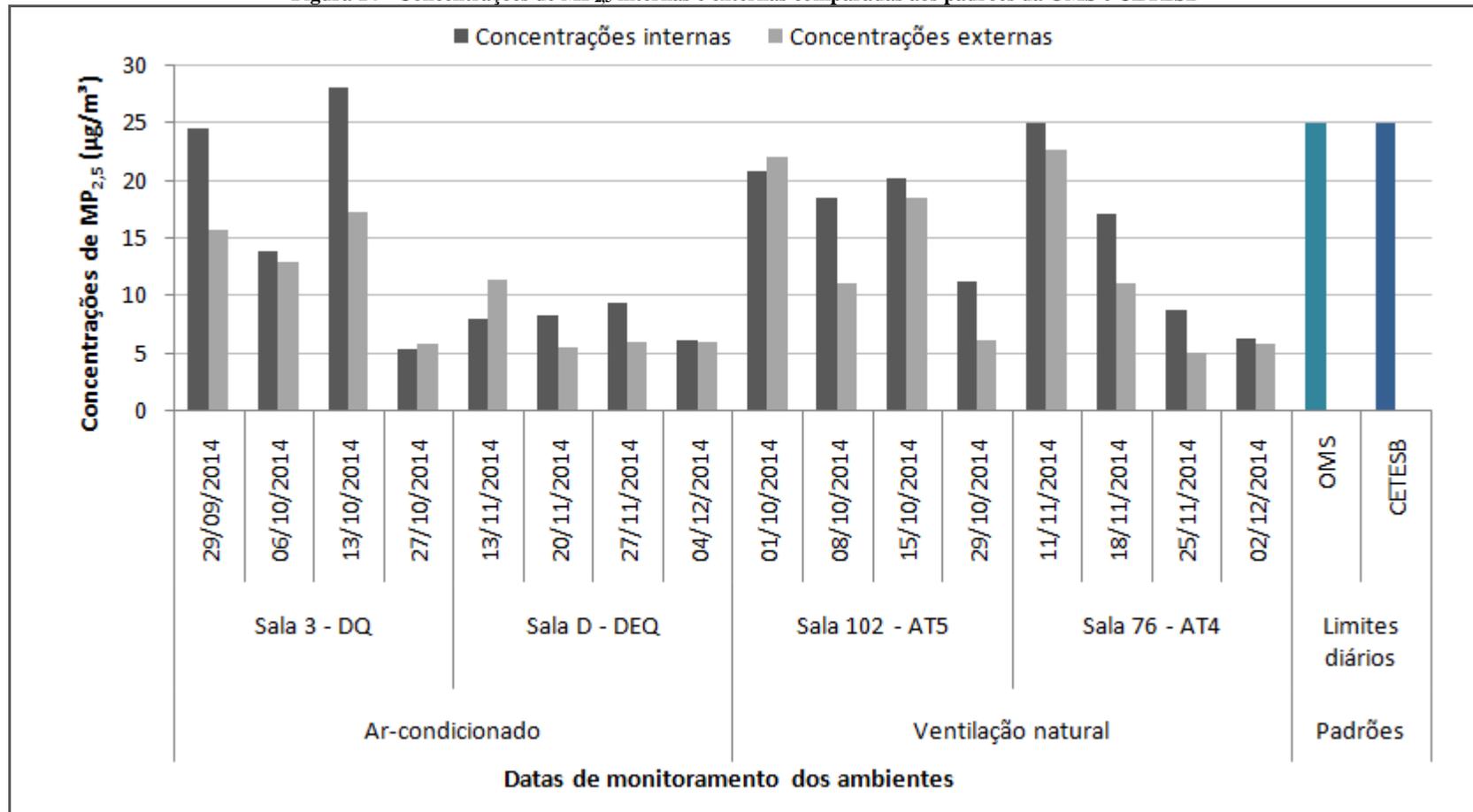
Os dados de massas e volumes utilizados nos cálculos das concentrações encontram-se nas tabelas do Apêndice A, onde m_i representa a massa inicial das membranas (com desvio de $\pm 0,000002$ g), m_f simboliza a massa final e Δm é o resultado da subtração entre m_f e m_i .

Tabela 3 - Concentrações de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Concentrações de MP _{2,5} (µg m ⁻³)			Concentrações de MP ₁₀ (µg m ⁻³)			Concentrações de MPT (µg m ⁻³)		
			Interna	Externa	Índice I/E	Interna	Externa	Índice I/E	Interna	Externa	Índice I/E
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	24,41	15,54	1,57	35,95	20,90	1,72	41,09	39,68	1,04
		06/10/2014	13,79	12,83	1,07	29,41	22,86	1,29	32,69	25,21	1,30
		13/10/2014	28,00	17,09	1,64	35,84	48,25	0,74	40,98	53,43	0,77
		27/10/2014	5,30	5,70	0,93	9,21	10,87	0,85	17,87	18,66	0,96
	Sala D - DEQ	13/11/2014	7,81	11,32	0,69	24,51	14,24	1,72	27,12	20,60	1,32
		20/11/2014	8,25	5,35	1,54	10,74	20,19	0,53	21,62	53,39	0,41
		27/11/2014	9,21	5,94	1,55	11,63	9,06	1,28	13,68	14,59	0,94
		04/12/2014	6,00	5,88	1,02	8,68	15,69	0,55	11,90	17,99	0,66
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	20,74	21,91	0,95	34,92	28,84	1,21	55,45	32,38	1,71
		08/10/2014	18,33	10,99	1,67	40,74	29,67	1,37	47,03	65,98	0,71
		15/10/2014	20,09	18,45	1,09	25,10	28,36	0,88	28,49	30,92	0,92
		29/10/2014	11,11	6,03	1,84	16,97	9,39	1,81	19,98	19,62	1,02
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	24,94	22,51	1,11	45,03	44,27	1,02	57,41	47,49	1,21
		18/11/2014	17,02	11,04	1,54	38,77	35,60	1,09	46,18	39,66	1,16
		25/11/2014	8,61	4,92	1,75	14,82	14,38	1,03	28,36	21,57	1,31
		02/12/2014	6,15	5,79	1,06	19,06	13,24	1,44	22,08	21,61	1,02

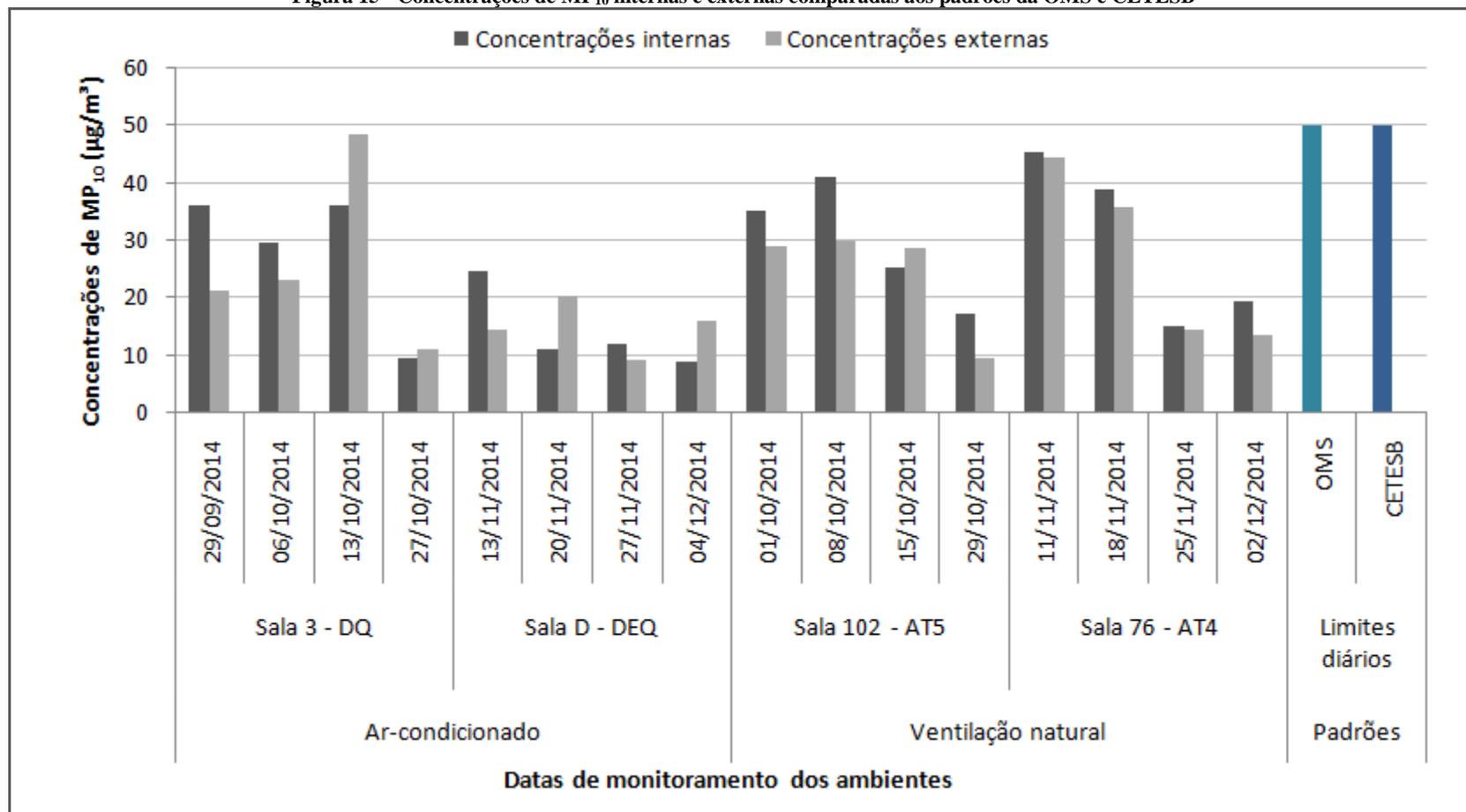
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14 - Concentrações de MP_{2,5} internas e externas comparadas aos padrões da OMS e CETESB



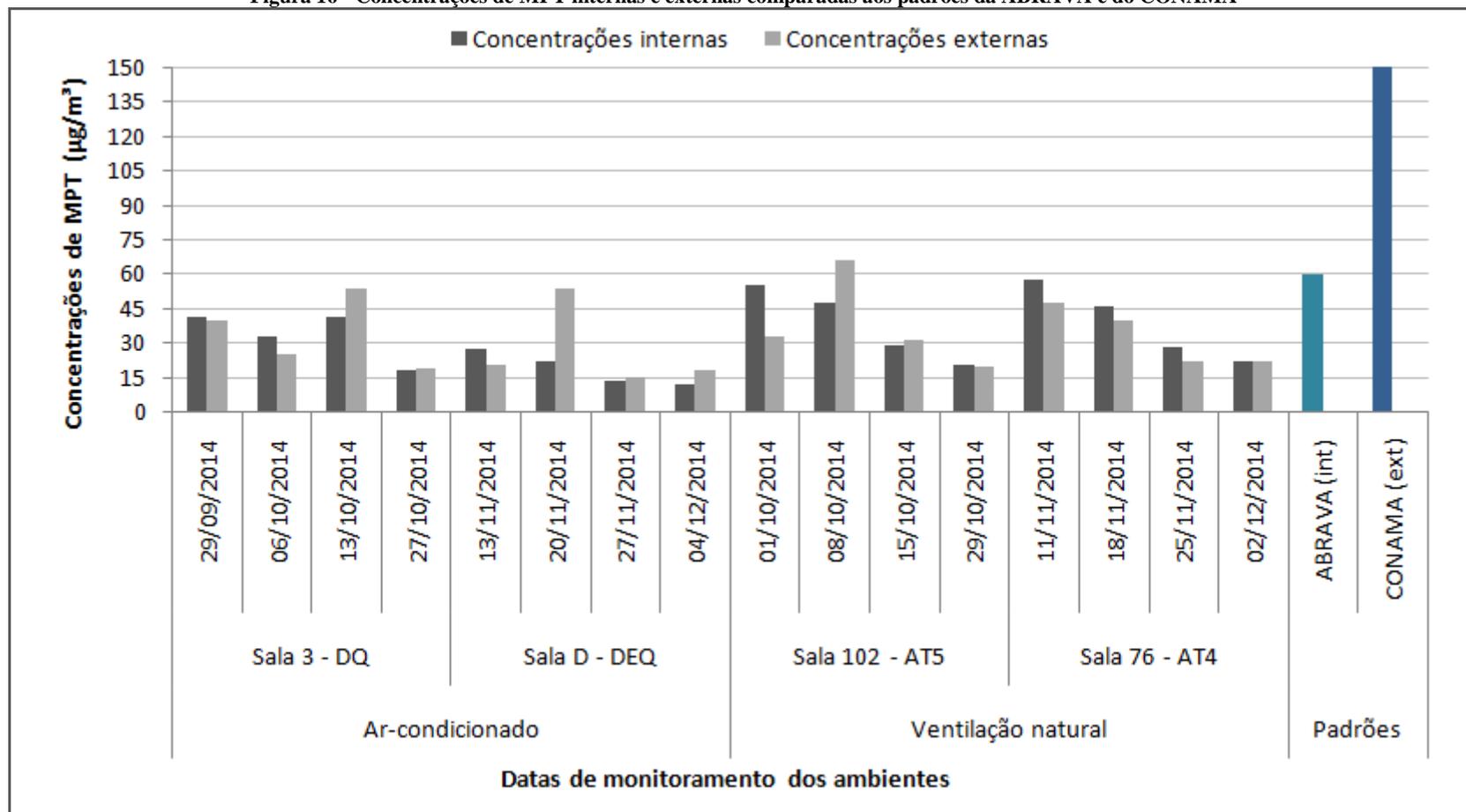
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15 - Concentrações de MP₁₀ internas e externas comparadas aos padrões da OMS e CETESB



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 16 - Concentrações de MPT internas e externas comparadas aos padrões da ABRAVA e do CONAMA



Fonte: Elaborada pela autora.

Observação: Como o padrão proposto para MPT pela ABRAVA ($60 \mu\text{g m}^{-3}$) é mais restritivo do que o proposto pela ANVISA ($80 \mu\text{g m}^{-3}$), adotou-se o primeiro como referencial, porém como todas as concentrações internas foram inferiores a $60 \mu\text{g m}^{-3}$, este fato não altera a discussão da conformidade dos resultados com as normas vigentes.

Na Tabela 3 observa-se que para os interiores climatizados com ar-condicionado as concentrações de $MP_{2,5}$ variaram entre 5,30 e 28,00 $\mu\text{g m}^{-3}$, apresentando índices I/E entre 0,69 e 1,64, sendo que em 75% das amostragens estes índices foram superiores a 1,00, indicando que majoritariamente as concentrações internas foram superiores às externas. Para as salas com ventilação natural esta porcentagem foi de 87,5% e os índices estiveram na faixa de 0,95 a 1,84, enquanto as concentrações de $MP_{2,5}$ variaram entre 6,15 e 24,94 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Na Figura 14 verifica-se que em apenas uma data (13/10/2014, em sala de ar-condicionado) o valor de 25,00 $\mu\text{g m}^{-3}$ preconizado pela CETESB (SÃO PAULO, 2013) e pela OMS (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2005) como limite diário para $MP_{2,5}$ foi excedido. Cabe a ressalva que estes padrões são para ambientes externos em amostragens de 24 horas, mas conforme previamente citado, na ausência de normas específicas para interiores e para tempos inferiores de amostragem, adotaram-se estas.

Para as concentrações de MP_{10} expostas na Tabela 3 e na Figura 15 verifica-se que o valor máximo recomendado (VMR) de 50,00 $\mu\text{g m}^{-3}$ não foi ultrapassado e que para as salas com ar-condicionado elas variaram entre 8,68 e 35,95 $\mu\text{g m}^{-3}$, enquanto para as de ventilação natural estiveram na faixa de 14,82 a 45,03 $\mu\text{g m}^{-3}$. Com relação aos índices I/E, em metade das amostragens nas salas com ar-condicionado os valores foram superiores a 1,00 (variaram entre 0,53 e 1,72), enquanto em 87,5% das vezes o mesmo ocorreu para as salas com ventilação natural (faixa de 0,88 a 1,81), mostrando que predominantemente as concentrações internas foram superiores às externas.

Com relação às concentrações de MPT, para as salas com ar-condicionado variaram entre 11,90 e 41,09 $\mu\text{g m}^{-3}$ e para as de ventilação natural estiveram entre 19,98 e 57,41 $\mu\text{g m}^{-3}$, assim, todos os valores estiveram abaixo do limite de 60,00 $\mu\text{g m}^{-3}$ da ABRAVA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2003), conforme mostra a Tabela 3 e a Figura 16. Os valores externos também foram inferiores ao preconizado pela RE 03/1990 do CONAMA (BRASIL, 1990). Para MPT os índices I/E estiveram compreendidos entre 0,41 e 1,32 (62,5% foram inferiores a 1,00) para as salas com ar-condicionado e entre 0,71 e 1,71 (75% foram superiores a 1,00) para as salas com ventilação natural, indicando que na maioria das amostragens nos locais ventilados naturalmente as concentrações internas foram superiores às externas, tendo ocorrido o oposto nos ambientes climatizados artificialmente.

De um modo geral as concentrações internas de $MP_{2,5}$, MP_{10} e MPT foram maiores nas salas ventiladas naturalmente e atentou-se para a rotina de limpeza das salas de aula

para constatar se influenciaram nos resultados. Tanto para estas salas como para as climatizadas o procedimento de limpeza do chão era o mesmo: apenas varrido com vassoura sem aplicação de outros produtos três vezes por dia (07:00, 12:00, 18:30). Nos dias de monitoramento era solicitado que a faxina das 12h não fosse realizada para evitar a ressuspensão de pó na sala durante a amostragem. Entretanto, apenas nas salas com ventilação natural havia lousas de giz que, além de serem utilizadas no decorrer das aulas pelo professor, deviam inevitavelmente ser “apagadas” no intervalo entre os períodos, tornando-se uma relevante fonte de partículas no ar. Portanto, pode-se inferir que as diferenças nas concentrações internas não sejam decorrentes apenas do diferente tipo de ventilação, mas também da utilização de quadros de giz.

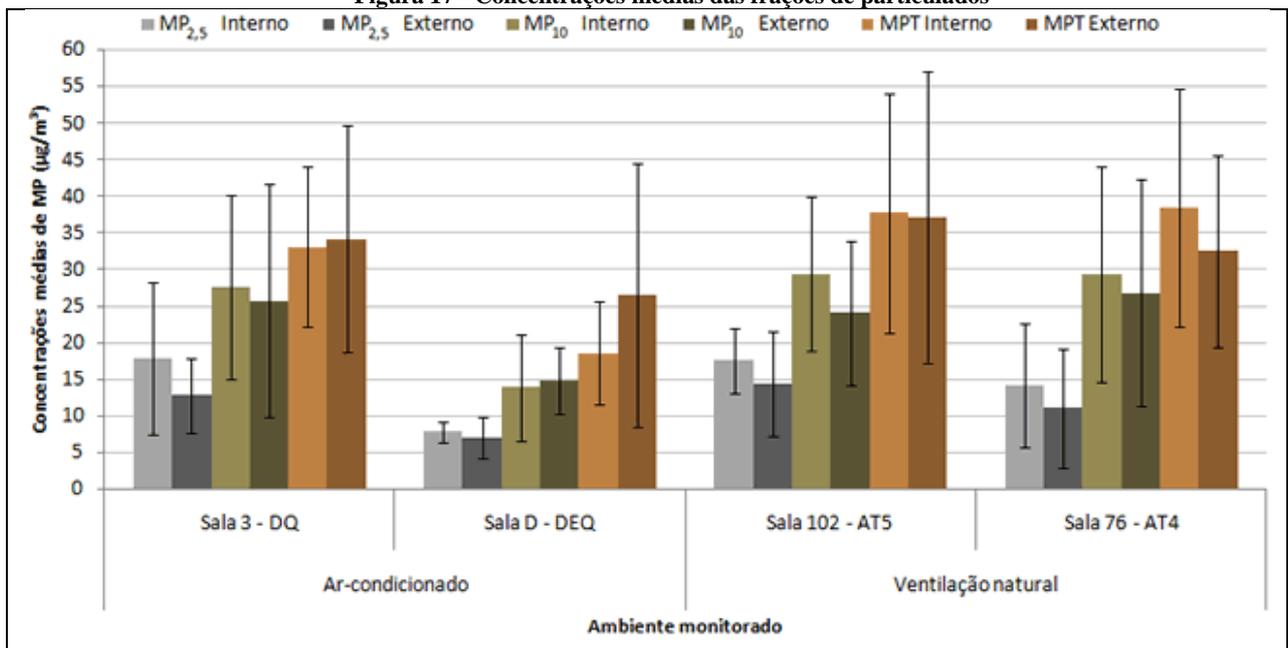
Para melhor visualizar estas tendências gerais observadas nas salas monitoradas, optou-se por calcular as médias aritméticas por ambiente e também os desvios padrão associados. Os resultados encontram-se na Tabela 4 e representados graficamente na Figura 17, na qual os desvios padrão estão representados por barras de erros.

Tabela 4 - Concentrações médias e desvios padrão dos particulados

Tipo de ventilação	Ambiente	Concentrações internas ($\mu\text{g m}^{-3}$): média \pm desvio			Concentrações externas ($\mu\text{g m}^{-3}$): média \pm desvio		
		MP _{2,5}	MP ₁₀	MPT	MP _{2,5}	MP ₁₀	MPT
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	17,88 \pm 10,33	27,60 \pm 12,64	33,16 \pm 10,92	12,79 \pm 5,04	25,72 \pm 15,91	34,25 \pm 15,51
	Sala D - DEQ	7,82 \pm 1,35	13,89 \pm 7,19	18,58 \pm 7,09	7,12 \pm 2,81	14,80 \pm 4,59	26,64 \pm 18,00
Ventilação natural	Sala 102 - AT5	17,57 \pm 4,42	29,43 \pm 10,52	37,74 \pm 16,34	14,35 \pm 7,18	24,07 \pm 9,80	37,23 \pm 20,00
	Sala 76 - AT4	14,18 \pm 8,55	29,42 \pm 14,74	38,51 \pm 16,22	11,07 \pm 8,09	26,87 \pm 15,50	32,58 \pm 13,09

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 17 - Concentrações médias das frações de particulados



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 17 nota-se que as concentrações de particulados apresentaram significativos desvios padrão (alguns corresponderam a mais da metade da respectiva concentração média), o que indica acentuada assimetria nas séries de dados consideradas. Verificou-se também que as concentrações médias internas foram superiores às externas, exceto para MPT nas salas com ar-condicionado e MP₁₀ na sala D (DEQ) e, além disso, as salas ventiladas apresentaram concentrações médias maiores que as climatizadas, fato consonante com resultados de pesquisas internacionais como a de Bartlett et al. (2004).

Para verificar a contribuição das frações mais finas nas concentrações de particulados de diâmetros maiores, pode-se dividir a concentração da fração de diâmetro menor pela de diâmetro maior, e neste trabalho são de interesse as razões percentuais MP_{2,5}/MP₁₀ (indicará o percentual de partículas de até 2,5 micrômetros contidas no MP₁₀) e MP₁₀/MPT (indicará o percentual de partículas de até 10 micrômetros contidas no MPT) cujos valores estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Razões MP_{2,5}/MP₁₀ e MP₁₀/MPT

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Dados internos		Dados externos	
			MP _{2,5} /MP ₁₀ (%)	MP ₁₀ /MPT (%)	MP _{2,5} /MP ₁₀ (%)	MP ₁₀ /MPT (%)
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	67,91	87,50	74,38	52,66
		06/10/2014	46,87	89,97	56,11	90,67
		13/10/2014	78,13	87,47	35,42	90,32
		27/10/2014	57,53	51,54	52,46	58,25
	Sala D - DEQ	13/11/2014	31,87	90,40	79,47	69,15
		20/11/2014	76,79	49,68	26,49	37,83
		27/11/2014	79,19	84,97	65,53	62,14
		04/12/2014	69,10	72,96	37,48	87,20
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	59,38	62,98	75,98	89,07
		08/10/2014	44,99	86,64	37,03	44,96
		15/10/2014	80,03	88,09	65,04	91,71
		29/10/2014	65,48	84,92	64,19	47,88
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	55,40	78,42	50,86	93,22
		18/11/2014	43,90	83,95	31,01	89,76
		25/11/2014	58,10	52,25	34,25	66,68
		02/12/2014	32,29	86,31	43,73	61,26

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 5 verifica-se grande variação nos percentuais, calculando-se a média aritmética dos dados da relação MP_{2,5}/MP₁₀ das salas com ar-condicionado obtém-se 63,42%, enquanto em seu exterior foi de 53,42%. Já para as salas com ventilação natural a média foi 54,95% e a externa foi 50,26%. Estes dados apontam que em média o MP₁₀ é composto por mais de 50% em massa de MP_{2,5}, ou seja, metade das massas de MP₁₀ é composta por partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 micrômetros.

O estudo de Bruno (2005) em um ambiente aberto de São Carlos (uma praça na região central) encontrou esta relação variando de 30% a 80% entre abril e setembro (estação seca), e sendo em média 31% entre outubro e março (estação chuvosa) para os anos de 2001 e 2002. Em 2012, Schornobay monitorando ambientes interno e externo de uma loja situada no centro de São Carlos, obteve similaridade entre as razões $MP_{2,5}/MP_{10}$ para ambos locais e verificou que a massa de MP_{10} era composta, em média, por mais de 50% em massa de $MP_{2,5}$, fato condizente aos valores médios encontrados neste trabalho.

Já a contribuição média de MP_{10} para MPT foi maior que a encontrada para a relação $MP_{2,5}/MP_{10}$. Nas salas com ar-condicionado a média aritmética para a razão MP_{10}/MPT foi de 76,81% e externamente verificou-se 68,53%, enquanto para as salas com ventilação natural obteve-se 77,94% e no ambiente externo foi de 73,07%.

Na literatura sobre qualidade do ar de interiores e exteriores um fator que influi nas oscilações das concentrações de particulados é o nível de precipitação pluviométrica, pois as chuvas auxiliam na decantação de particulados, atuando como um agente de autodepuração da atmosfera. Este assunto é o tema da subseção a seguir.

5.1.2 Correlação entre concentrações de MP e níveis de precipitação pluviométrica

Pesquisas sobre QAI relevam as condições meteorológicas da região de estudo e é comum verificar estações do ano (primavera, verão, outono e inverno) com características sazonais bem definidas em outros países. Porém, segundo Pozza (2005) a região de São Carlos possui características peculiares, sendo possível separar as estações do ano em duas: estação seca (abril a setembro), a qual apresenta menor incidência de chuvas, e estação chuvosa (outubro a março). Este fato pode ser comprovado observando a Tabela 6, que apresenta as médias aritméticas mensais referentes ao período de 1992 e 2010 na cidade de São Carlos.

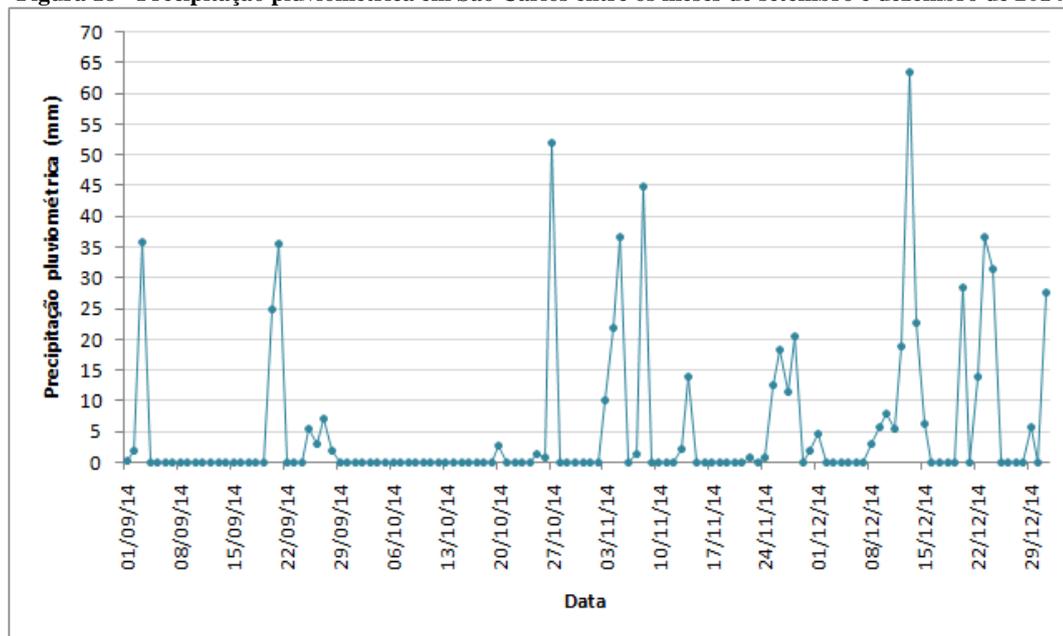
O monitoramento no segundo semestre de 2014 foi iniciado no dia 29 de setembro, penúltimo dia do denominado período seco, logo, pode-se considerar que o estudo foi realizado no período chuvoso. Obtiveram-se os dados de precipitação pluviométrica da estação de monitoramento do INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015a) da cidade de São Carlos, que está situada dentro da UFSCar, para os meses de setembro a dezembro de 2014, os quais se encontram no Anexo A e foram plotados na Figura 18.

Tabela 6 - Médias de precipitação pluviométrica na cidade de São Carlos no período de 1992 a 2010

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)	Estação do ano padrão	Estação segundo índice de chuvas
Janeiro	274,7	Verão	Chuvosa
Fevereiro	224,4	Verão	
Março	142,9	Verão/Outono	
Abril	62,7	Outono	Seca
Maio	50,9	Outono	
Junho	28,6	Outono/Inverno	
Julho	28,3	Inverno	
Agosto	22,8	Inverno	
Setembro	60,2	Inverno/Primavera	Chuvosa
Outubro	102,6	Primavera	
Novembro	144,5	Primavera	
Dezembro	218,8	Primavera/Verão	

Fonte: Adaptação de tabela disponível em EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2015

Figura 18 - Precipitação pluviométrica em São Carlos entre os meses de setembro e dezembro de 2014

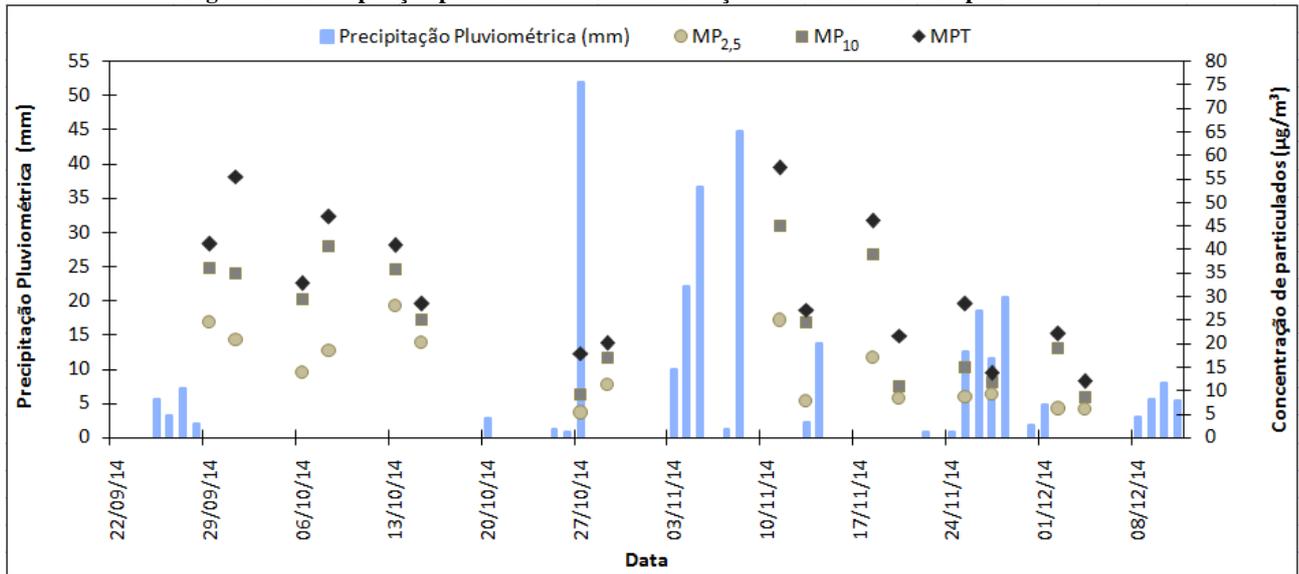


Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015a.

É importante comentar que o ano de 2014 foi atípico em relação ao índice de chuvas. Os dados do Anexo A permitem verificar que a precipitação pluviométrica total foi de 116 mm para o mês de setembro, 56,7 mm em outubro, 196,8 mm em novembro e 281,5 mm em dezembro, valores bastante discrepantes das médias mensais apresentadas na Tabela 6.

Para visualizar a relação entre as concentrações das frações de material particulado obtidas internamente e o índice de chuvas, pode-se plotar ambas variáveis em um mesmo gráfico. A Figura 19 apresenta este gráfico, no qual é perceptível uma leve tendência de redução das concentrações de particulados nos dias chuvosos.

Figura 19 - Precipitação pluviométrica X Concentrações de MP internas no período de estudo



Fonte: Elaborada pela autora.

Foram obtidos, também, os coeficientes de correlação cruzada (ver Equação 11 na subseção 4.7.2), com os respectivos p-valores, entre os índices de precipitação e as concentrações de MP, que se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de correlação cruzada entre precipitação pluviométrica (PP) e MP

Ambiente	Dados internos de MP			Dados externos de MP		
	MP _{2,5} x PP	MP ₁₀ x PP	MPT x PP	MP _{2,5} x PP	MP ₁₀ x PP	MPT x PP
Salas com ar-condicionado	-0,40 (p-valor: 0,32)	-0,46 (p-valor: 0,25)	-0,38 (p-valor: 0,36)	-0,36 (p-valor: 0,17)	-0,38 (p-valor: 0,15)	-0,36 (p-valor: 0,17)
Salas com ventilação natural	-0,45 (p-valor: 0,27)	-0,50 (p-valor: 0,21)	-0,26 (p-valor: 0,53)	-0,43 (p-valor: 0,29)	-0,37 (p-valor: 0,37)	-0,34 (p-valor: 0,41)

Fonte: Elaborada pela autora.

A obtenção de correlações negativas indica que as duas variáveis se movem em sentidos contrários, ou seja, há uma tendência que em dias de alto índice pluviométrico sejam verificadas baixas concentrações de particulados, e vice-versa. Esta relação fica mais forte quanto mais o coeficiente r aproxima-se de -1 , porém verificaram-se valores similares para ambientes climatizados e ventilados naturalmente e todas as correlações foram fracas, com p-valores superiores a $0,05$ (que corresponde à porcentagem de significância adotada, 5%), indicando que estatisticamente não há correlação significativa entre as variáveis no período estudado.

O estudo de Comin (2012) em salas de aula de ventilação natural de uma escola da região central de São Carlos também obteve valores semelhantes de correlação cruzada para os dados de precipitação pluviométrica (PP) e concentrações de MP, os quais estão listados a seguir:

$$PP \times MP_{2,5} \rightarrow r = -0,33$$

$$PP \times MP_{10} \rightarrow r = -0,35$$

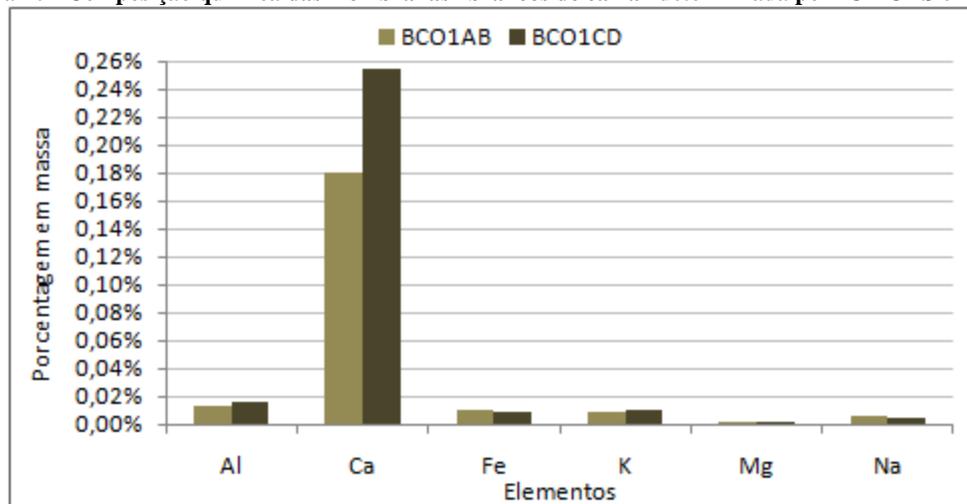
$$PP \times MPT \rightarrow r = -0,34$$

Estas similaridades encontradas na literatura e obtidas experimentalmente podem ser um indício que a ocorrência de chuvas contribuiu pouco e de forma pontual na redução das concentrações destas frações de particulados.

5.1.3 Composição química do MP e possíveis fontes emissoras

Inicialmente analisaram-se as duas membranas selecionadas como brancos de caixa, uma do mesmo lote das utilizadas nas coletas nas salas do DQ e AT5 (denominada BCO1AB) e outra do mesmo lote das empregadas nas coletas das salas do DEQ e AT4 (denominada BCO1CD). As análises por ICP-MS e ICP-OES detectaram níveis traços de metais nestas membranas de Teflon[®] e os elementos com as concentrações mais relevantes foram Al, Ca, Fe, K, Mg e Na, cujas porcentagens foram apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Composição química das membranas “brancos de caixa” determinada por ICP-OES e ICP-MS



Fonte: Elaborada pela autora.

Na sequência foram analisadas as membranas utilizadas como branco de campo (aquelas que acompanharam o trajeto entre o laboratório e as salas de aula em suportes plásticos lacrados) e foram obtidas concentrações elementares semelhantes a dos brancos de caixa, exceto para o elemento cálcio que apresentou maiores concentrações nos trajetos até as salas de ventilação natural (102 do AT5 e 76 do AT4), evento que facilmente se associa ao uso de giz nesses ambientes, que possui em sua composição sulfato e carbonato de cálcio.

Para as membranas que efetivamente coletaram particulados, conforme citado na subseção 4.2.3, foram selecionadas aquelas utilizadas na primeira quinzena de monitoramento de cada sala e durante as análises as concentrações elementares dos brancos de caixa foram descontadas das concentrações obtidas para cada amostra. Assim, os resultados por ICP-OES (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Sr e S) e ICP-MS (demais elementos) para as amostras de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT encontram-se no Apêndice B. A partir destes dados subdividiram-se os 27 elementos identificados em faixas de concentração conforme mostra a Tabela 8, onde se constata que Al, Ca, Fe e S foram elementos majoritários em todas as frações de particulados analisadas.

Tabela 8 - Faixas de concentração dos elementos identificados nas amostras de MP_{2,5}, MP₁₀ e MPT

Particulado	Faixa de concentração média	Elementos
MP _{2,5}	0,01 – 0,3 ng m ⁻³	Cd, Ga, La, Pr, Sb, Y
	0,3 – 1,2 ng m ⁻³	Ce, Rb, Sn, Sr, V, Zr
	1,2 – 5,0 ng m ⁻³	Au, Cu, Mn, Ni, Pb, Ti
	5 – 50 ng m ⁻³	Ba, Mg, Zn
	50 – 800 ng m ⁻³	Al, Ca, Fe, K, Na, S
MP ₁₀	0,01 – 1,0 ng m ⁻³	Cd, Ga, La, Pr, Rb, Sb, Sn, Y
	1 – 5 ng m ⁻³	Au, Ce, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zr
	5 – 50 ng m ⁻³	Ba, Mn, Ti, Zn
	0,05 – 1,8 µg m ⁻³	Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S
MPT	0,01 – 1,0 ng m ⁻³	Cd, Ga, La, Pr, Rb, Sb, Sn, Y
	1 – 10 ng m ⁻³	Au, Ce, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zr
	10 – 50 ng m ⁻³	Ba, Mn, Ti, Zn
	50 – 500 ng m ⁻³	K, Mg, Na
	0,5 – 3,5 µg m ⁻³	Al, Ca, Fe, S

Fonte: Elaborada pela autora.

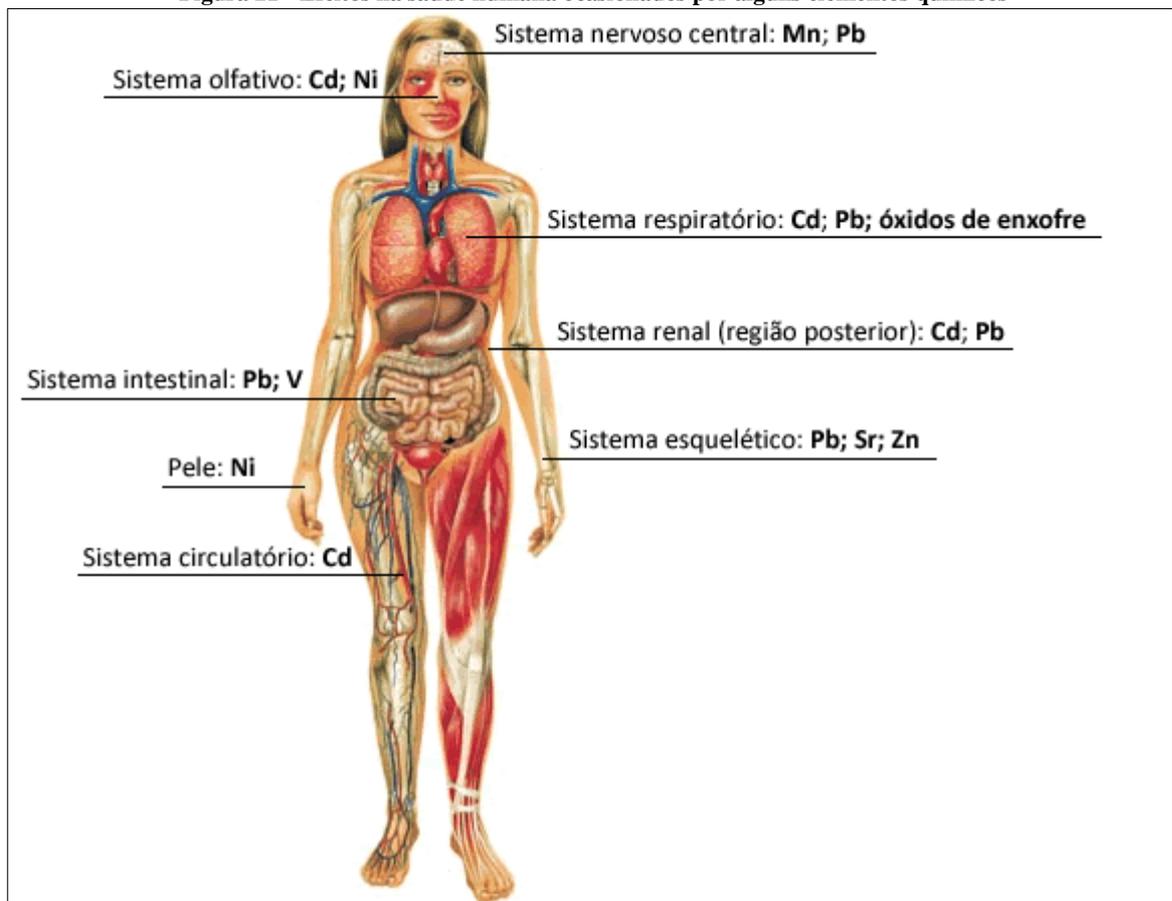
Em relação aos elementos minoritários, no Brasil, segundo a NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 1978, cuja última portaria com atualizações data de 13/08/2014), o limite de tolerância para a concentração de chumbo é 0,1 mg m⁻³ para exposições de até 48 horas semanais. As concentrações obtidas na sala de aula foram inferiores a 4,5 ng m⁻³ (ver Apêndice B), portanto, abaixo de níveis alarmantes de acordo com esta norma.

Ainda são escassas normas nacionais com limites de concentração para metais, mas pode-se recorrer aos padrões da OMS (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2000) para outros metais de reconhecida toxicidade como Cd, Mn, Ni e V para comparar com as concentrações obtidas neste estudo (apresentadas no Apêndice B):

- cádmio = 5 ng m^{-3} : todas as concentrações foram inferiores a $0,45 \text{ ng m}^{-3}$;
- manganês = $0,15 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$: as concentrações estiveram abaixo de $23,77 \text{ ng m}^{-3}$;
- níquel = $1 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$: nenhuma concentração foi superior a $4,60 \text{ ng m}^{-3}$;
- vanádio = 20 ng m^{-3} : a maior concentração verificada foi de $3,69 \text{ ng m}^{-3}$.

É interessante destacar que a preocupação com o controle de emissão destes elementos químicos decorre dos seus efeitos na saúde que foram sintetizados na Figura 21.

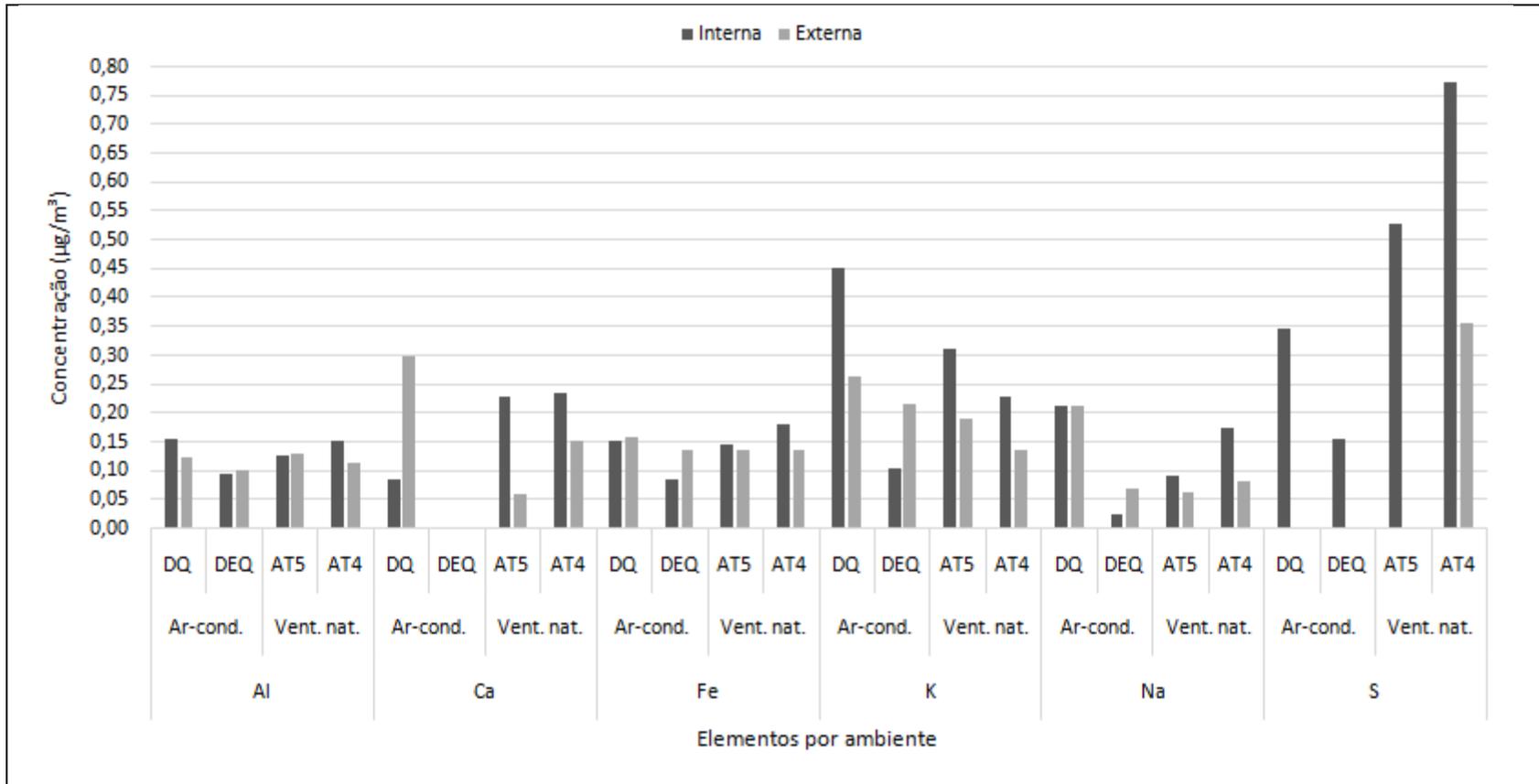
Figura 21 - Efeitos na saúde humana ocasionados por alguns elementos químicos



Fonte: Adaptação de figura disponível em KLICK EDUCAÇÃO, 2015.

Com o propósito de ilustrar as diferenças entre as salas com ventilação natural (AT5 - sala 102 e AT4 - sala 76) e com ar-condicionado (DQ - sala 3 e DEQ - sala D) para os elementos de maiores concentrações (apresentados na Tabela 8), foram elaborados gráficos que estão apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, nas quais se verifica que principalmente cálcio e enxofre foram os elementos mais abundantes nas salas com ventilação natural.

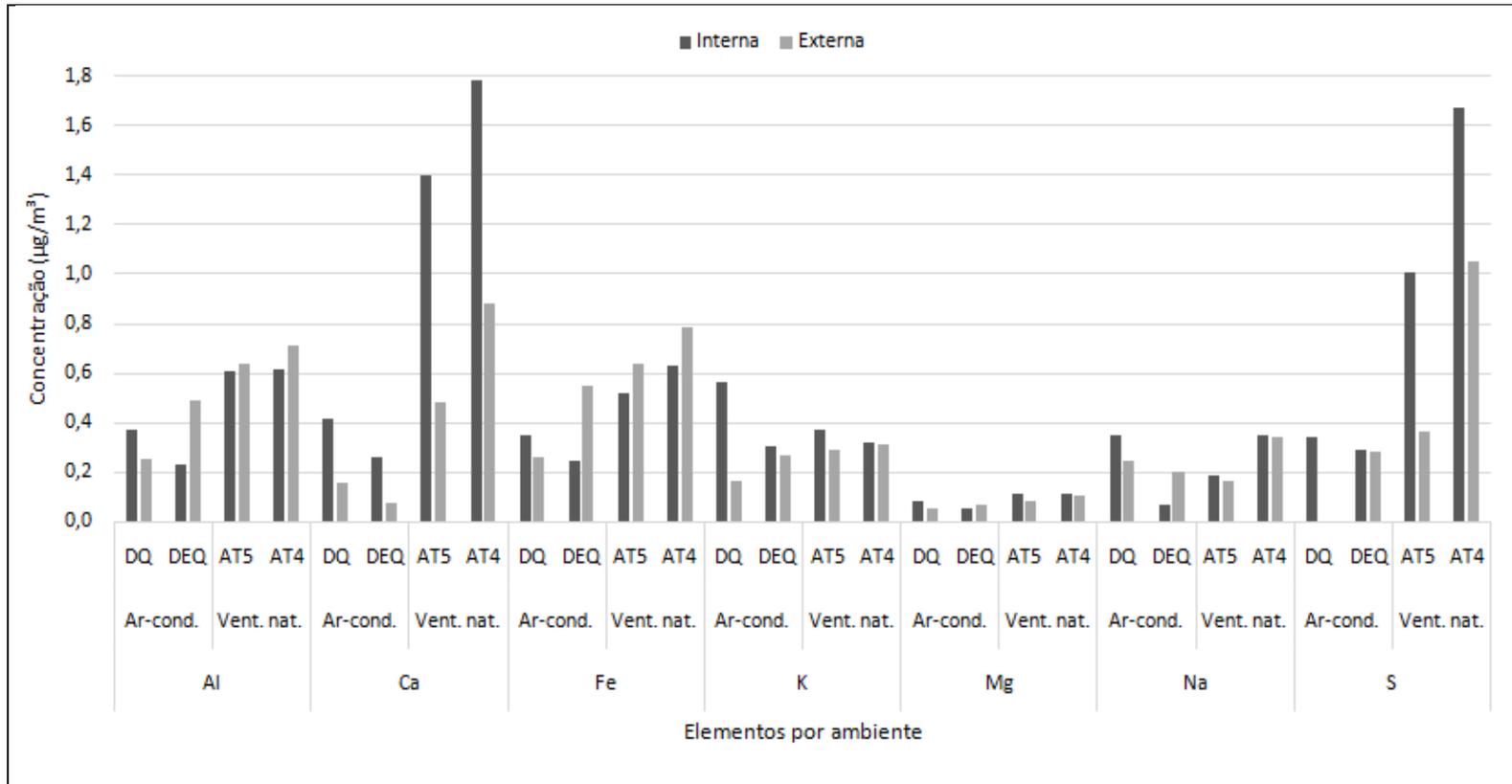
Figura 22 - Elementos majoritários identificados nas amostras de MP_{2,5}



Fonte: Elaborada pela autora.

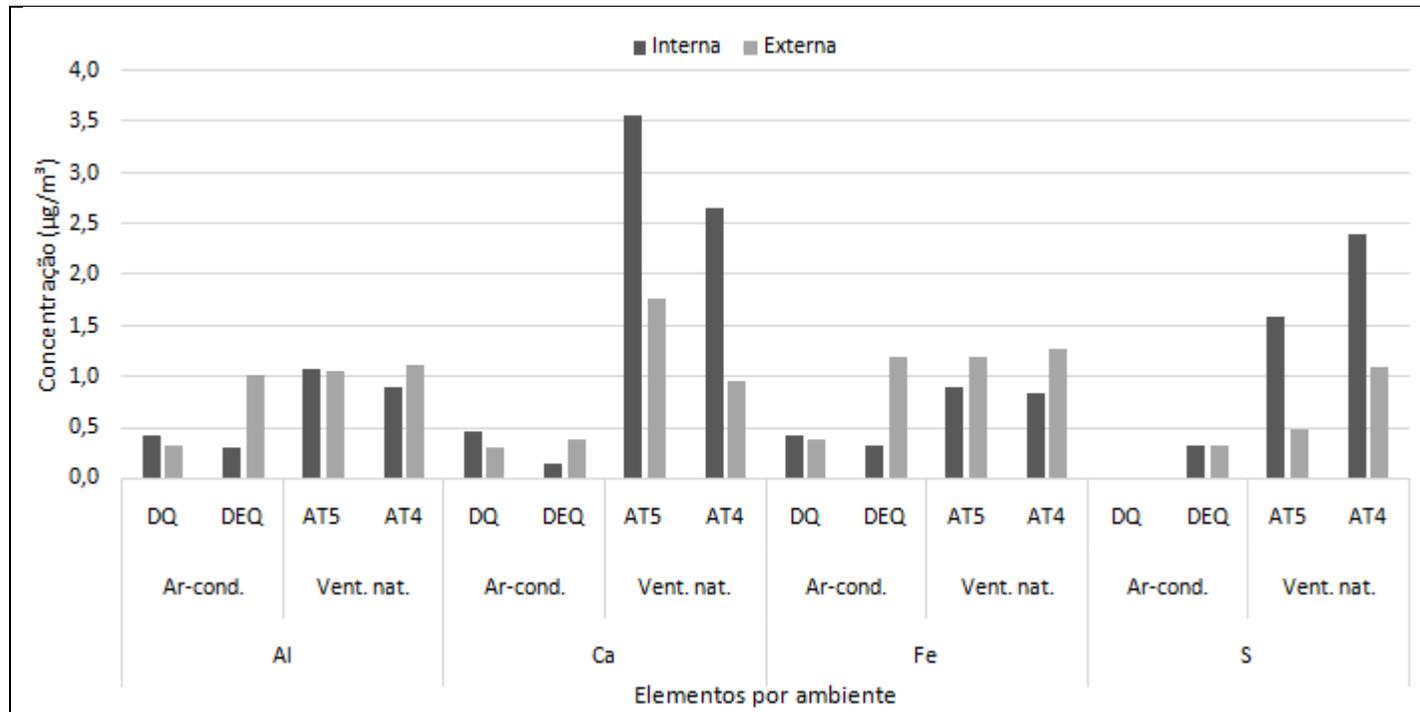
Observação: Algumas concentrações de enxofre estiveram abaixo do limite de detecção, por este motivo não constam no gráfico apresentado. Para o cálcio, na sala D do DEQ, os valores de concentração foram menores que os obtidos para o branco de caixa correspondente.

Figura 23 - Elementos majoritários identificados nas amostras de MP₁₀



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 24 - Elementos majoritários identificados nas amostras de MPT



Fonte: Elaborada pela autora.

Uma das grandes vantagens da aplicação de ICP-MS e ICP-OES sobre outras técnicas analíticas é a alta precisão na identificação de metais traços (quantificando em níveis de ppb e ppt), porém apresenta limitações para detecção de elementos formadores de óxidos refratários (como Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Mo, Cr, Sn) e de silício. Para a extração de Si seria necessário utilizar ácido fluorídrico que devido a sua alta toxicidade demanda uma série de cuidados, podendo também danificar certas partes dos equipamentos de ICP, assim optou-se por utilizar ácido nítrico. Esta ressalva é importante, pois observando as concentrações apresentadas no Apêndice B, ao realizar o somatório para os 27 elementos detectados constata-se que correspondem entre 4 e 16% da concentração do particulado retido nas membranas antes da extração. Isto pode indicar que parte da composição destes particulados seja de silicatos ou de outros óxidos refratários que não foram eficientemente extraídos para serem quantificados pelas técnicas aplicadas. Devido à destruição das membranas na extração ácida não é possível aplicar uma técnica complementar como Fluorescência de raios-X (FRX) ou Espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDX) para verificar o percentual de silício presente, por exemplo. Além disso, apenas foi realizada a análise de metais no MP, não foram determinadas as concentrações de íons, nem a parte orgânica presente.

De um modo geral, as salas com ventilação natural apresentaram maiores concentrações do que as climatizadas com ar-condicionado para a maioria dos elementos e, além disso, foi verificado que todos os elementos detectados nos interiores, também foram identificados nos exteriores, indicando transporte de particulados de origem externa pelo vento. Para embasar esta discussão recorreu-se aos dados de velocidade e direção dos ventos disponibilizados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015b) cuja estação de monitoramento em São Carlos se situa na UFSCar. Selecionaram-se os dados das medições realizadas às 12:00 para apresentação na Tabela 9.

Tabela 9 - Velocidade e direção dos ventos nos dias de monitoramento

Data	Velocidade dos ventos (m s⁻¹)	Direção dos ventos
29/09/2014	1,03	Norte
01/10/2014	1,00	Nordeste
06/10/2014	2,00	Nordeste
08/10/2014	3,00	Leste
13/10/2014	1,00	Nordeste
15/10/2014	1,00	Nordeste
27/10/2014	1,00	Leste
29/10/2014	1,00	Nordeste
11/11/2014	3,00	Leste
13/11/2014	1,00	Nordeste
18/11/2014	2,00	Sudeste
20/11/2014	1,00	Nordeste
25/11/2014	3,00	Nordeste
27/11/2014	1,00	Nordeste
02/12/2014	3,09	Leste
04/12/2014	1,03	Oeste

Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015b.

Na Tabela 9 nota-se que majoritariamente os ventos tiveram direção nordeste e considerando que as coordenadas geográficas da estação do INMET eram de latitude sul e longitude oeste (-21.980353, -47.883927), verificou-se que a sudoeste dela situam-se duas importantes indústrias da cidade, uma de produção de tintas e outra de papel e celulose, que podem originar particulados transportados pelo vento até a UFSCar. É importante citar que ambas estão localizadas na Rodovia Engenheiro Thales de Lorena Peixoto Júnior (SP-318) e que o intenso tráfego, principalmente de veículos pesados (como caminhões e ônibus) que utilizam como combustível o diesel (cuja queima gera óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre), também afeta a qualidade do ar da região.

Na indústria de papel e celulose vários produtos químicos, incluindo sulfato de sódio, hidróxido de sódio, clorato de sódio, cloro e peróxido de hidrogênio, são utilizados especialmente na etapa de produção da celulose. Para produzir determinados tipos de papéis são inclusos aditivos como caulim, tintas, carbonato de cálcio, látex, amidos, alvejantes e cola. Na indústria de produção de tintas, por sua vez, foi realizado um estudo da composição química do particulado presente por Kawamoto (2011) que verificou a presença de Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, P, Pb, S, Si, Sr, Ti e Zn nas amostras de MP₁₀ e MPT através da técnica de FRX, com destaque para altas concentrações de silício.

Para discutir a possível origem externa de alguns elementos identificados nas amostras, pode-se recorrer também ao inventário de fontes de material particulado para a cidade de São Carlos elaborado por Pozza (2005). Neste estudo, elencaram-se fontes poluentes para traçar o perfil de cada uma, ou seja, avaliar quais eram os elementos químicos originados por elas e suas concentrações. Os principais elementos identificados para os cinco perfis de fontes traçados estão apresentados a seguir:

1. Emissão veicular: Al, Ca, Fe, K, P, S, Si, Ti, Zn;
2. Ressuspensão de solo em vias pavimentadas: Al, Ca, Fe, K, P, S, Si, Ti;
3. Solo de terra exposta: Al, Ca, Fe, P, Si, Ti;
4. Queima de vegetação rasteira: Ca, Cl, K, S, Si;
5. Queima de cana-de-açúcar: Ca, Cl, Cu, Fe, K, Si, Zn.

O Quadro 7 resume possíveis fontes emissoras de material particulado externas às salas de aula, considerando os perfis acima e a numeração dada a eles como legenda, incluindo como sexto perfil o obtido para a indústria de tintas supracitado (KAWAMOTO, 2011):

6. Indústria de produção de tintas: Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, P, Pb, S, Si, Sr, Ti, Zn.

Quadro 7 - Possíveis fontes externas emissoras de alguns elementos identificados

Elemento identificado	Fontes externas
Al	1, 2, 3, 6
Ca	1, 2, 3, 4, 5, 6
Cu	5, 6
Fe	1, 2, 3, 5, 6
K	1, 2, 4, 5, 6
Mn	6
Pb	6
S	1, 2, 4, 6
Sr	6
Ti	1, 2, 3, 6
Zn	1, 5, 6

Fonte: Elaborado pela autora.

Para prosseguir na discussão sobre possíveis fontes emissoras dos elementos pode-se recorrer ao uso dos coeficientes de correlação cruzada e dos respectivos p-valores, apresentados na forma de matrizes, para melhor visualizar elementos que estiveram fortemente correlacionados com outros, indicando que podem provir da mesma fonte.

Uma importante ressalva é que neste trabalho, para análise de MP, quatro tipos de subdivisões dos dados são possíveis: por fração dos particulados, por tipo de ventilação da sala, por ambiente considerado (interno ou externo) e por local da amostragem (4 salas monitoradas). Porém, apenas uma membrana para cada cruzamento destas quatro informações foi analisada por ICP, impossibilitando a obtenção de várias matrizes de correlação dos dados. Para contornar esta limitação, assumiu-se que como o MP_{2,5} é uma fração do MP₁₀ e este do MPT, um determinado elemento detectado nestas três frações de particulados pode ter uma origem comum, independente das demais características dos locais de amostragem. Assim, construiu-se uma única matriz com os coeficientes de correlação (calculados pela Equação 11, ver subseção 4.7.2) que está apresentada na Tabela 10 e os p-valores correspondentes encontram-se no Apêndice C.

Na Tabela 10 foram destacados em tons de azul os valores de $r > 0,70$, pois são representativos de correlações significantes entre os elementos e esta relação fica mais forte quanto mais se aproxima de 1,00 (correlação positiva perfeita). Conforme descrito na subseção 4.7.3, o nível de significância adotado foi de 5%, portanto verificou-se que para p-valor $> 0,05$, os valores de coeficiente de correlação abaixo de 0,40 não tiveram relevância estatística.

Tabela 10 - Matriz de correlação das concentrações dos elementos detectados nas amostras de particulados*

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Sr	S	Ti	V	Mn	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Y	Zr	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Au	Pb	
Al	1,00																											
Ca	0,74	1,00																										
Fe	0,98	0,61	1,00																									
K	0,49	0,55	0,41	1,00																								
Mg	0,95	0,88	0,88	0,63	1,00																							
Na	0,58	0,55	0,54	0,60	0,69	1,00																						
Sr	0,82	0,96	0,71	0,62	0,93	0,68	1,00																					
S	0,59	0,84	0,49	0,39	0,69	0,59	0,87	1,00																				
Ti	0,96	0,68	0,93	0,41	0,89	0,52	0,78	0,57	1,00																			
V	0,97	0,63	0,99	0,42	0,88	0,58	0,73	0,56	0,93	1,00																		
Mn	0,96	0,71	0,95	0,42	0,91	0,59	0,79	0,61	0,88	0,95	1,00																	
Ni	0,35	0,68	0,21	0,40	0,47	0,21	0,59	0,44	0,30	0,93	0,25	1,00																
Cu	0,82	0,65	0,79	0,56	0,83	0,69	0,78	0,64	0,80	0,78	0,79	0,35	1,00															
Zn	0,31	0,56	0,20	0,82	0,50	0,46	0,55	0,28	0,22	0,20	0,28	0,59	0,36	1,00														
Ga	0,91	0,81	0,88	0,52	0,92	0,62	0,86	0,67	0,83	0,89	0,94	0,35	0,71	0,43	1,00													
Rb	0,59	0,62	0,51	0,91	0,69	0,60	0,66	0,42	0,52	0,52	0,55	0,47	0,59	0,81	0,64	1,00												
Y	0,98	0,66	0,98	0,44	0,91	0,62	0,77	0,57	0,95	0,98	0,96	0,22	0,82	0,22	0,89	0,53	1,00											
Zr	0,94	0,73	0,90	0,63	0,94	0,71	0,83	0,61	0,87	0,90	0,88	0,39	0,90	0,43	0,84	0,64	0,92	1,00										
Cd	0,48	0,56	0,45	0,38	0,53	0,66	0,64	0,85	0,41	0,55	0,54	0,15	0,58	0,13	0,58	0,33	0,51	0,54	1,00									
Sn	0,40	0,45	0,36	0,64	0,50	0,78	0,52	0,46	0,35	0,41	0,40	0,19	0,51	0,48	0,53	0,66	0,42	0,50	0,61	1,00								
Sb	0,39	0,51	0,34	0,16	0,42	0,39	0,53	0,75	0,39	0,44	0,45	0,22	0,43	-0,04	0,43	0,21	0,39	0,37	0,80	0,40	1,00							
Ba	0,66	0,72	0,61	0,54	0,76	0,67	0,72	0,50	0,59	0,61	0,71	0,33	0,52	0,60	0,86	0,69	0,63	0,64	0,42	0,68	0,23	1,00						
La	0,94	0,67	0,95	0,35	0,87	0,66	0,78	0,67	0,90	0,96	0,93	0,24	0,83	0,13	0,87	0,43	0,96	0,89	0,65	0,44	0,52	0,60	1,00					
Ce	0,99	0,71	0,98	0,44	0,93	0,62	0,81	0,63	0,94	0,97	0,96	0,29	0,84	0,23	0,91	0,53	0,99	0,93	0,55	0,42	0,43	0,64	0,98	1,00				
Pr	0,96	0,66	0,97	0,41	0,90	0,62	0,76	0,59	0,90	0,97	0,95	0,19	0,80	0,17	0,89	0,47	0,98	0,92	0,56	0,41	0,39	0,62	0,97	0,99	1,00			
Au	-0,14	-0,11	-0,13	0,20	-0,02	0,39	-0,06	-0,15	-0,18	-0,16	-0,16	0,06	0,19	0,27	-0,14	0,09	-0,13	0,16	-0,03	0,32	-0,21	0,11	-0,10	-0,13	-0,09	1,00		
Pb	0,84	0,74	0,81	0,60	0,86	0,70	0,82	0,75	0,76	0,86	0,87	0,36	0,80	0,42	0,86	0,66	0,83	0,87	0,76	0,60	0,63	0,68	0,84	0,84	0,83	0,05	1,00	

Fonte: Elaborada pela autora.

* Nível de confiança de 95%, nível de significância de 5% → p-valor ≤ 0,05

■ Não há correlação significativa entre o par de elementos (p-valor > 0,05)

Observando na Tabela 10 as correlações positivas muito fortes ($r > 0,90$), verifica-se similaridade nas associações entre Al e Fe com os elementos Ti, V, Mn, Y, Zr, La, Ce e Pr, indicando que todos eles podem ter sido originados pela mesma fonte. Para estes metais a ocorrência natural é em solos ou na forma de minerais, especialmente os lantanídeos, conhecidos como terras-raras.

Para elementos com reconhecidas toxicidades elevadas (como Cd, Mn, Ni, Pb e V) atentou-se para as significativas correlações do chumbo com boa parte dos metais analisados, sendo importante destacar que ele é utilizado em pigmentos e outras matérias-primas na indústria de tintas.

Outra correlação que merece destaque é o par de espécies traços V-Ni ($r = 0,93$) que são derivados da queima de diesel (AMARAL, 2010). De todos os 27 metais estudados apenas o ouro (Au, presente em concentrações traços) não teve correlação significativa com nenhum outro elemento.

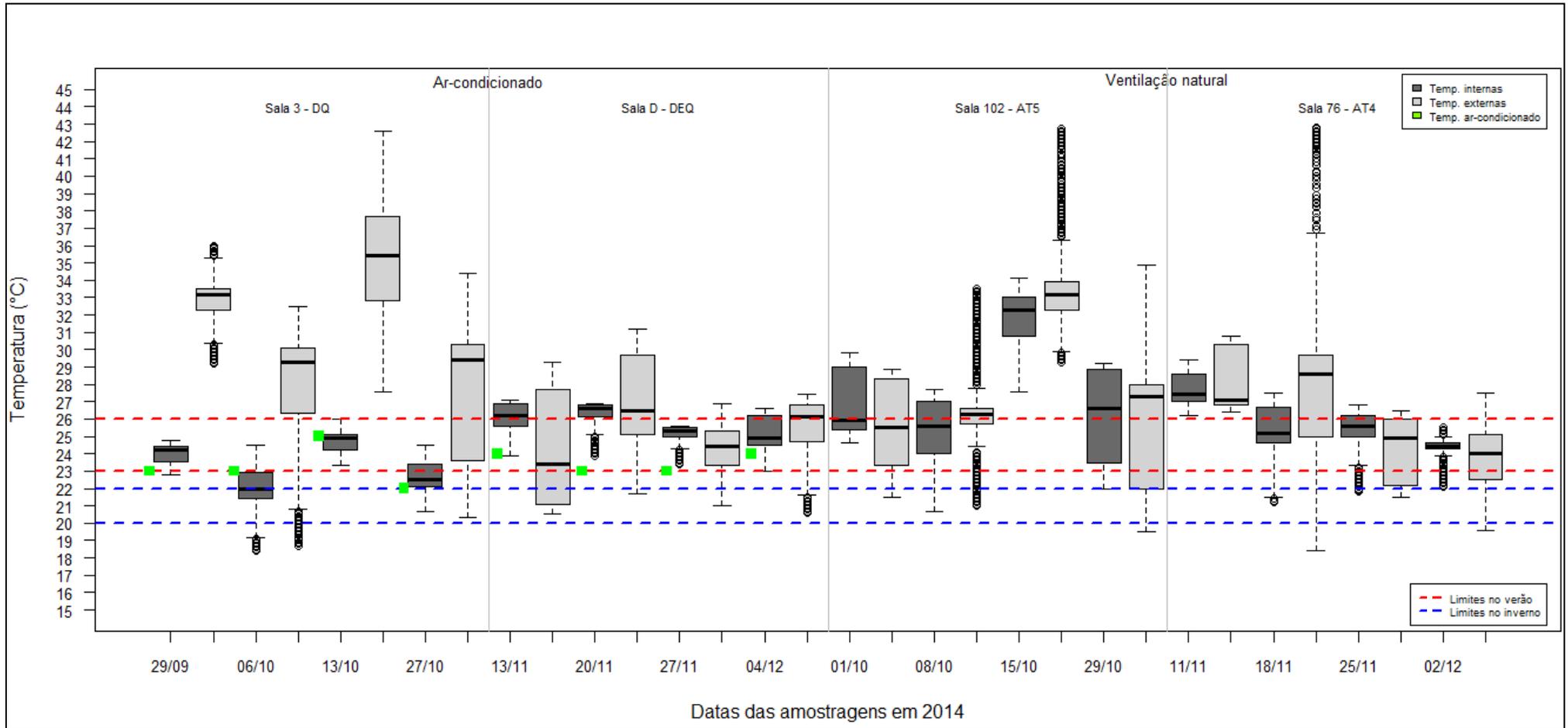
5.2 Temperatura e Umidade

Os resultados do monitoramento ambiental para temperatura e umidade encontram-se a seguir, conjuntamente, com discussões sobre conforto térmico, índices de calor e correlações cruzadas.

5.2.1 Temperatura

Os níveis de temperatura foram monitorados com o equipamento EVM-7 e a Tabela 11 traz as médias aritméticas, medianas e desvios padrão dos valores amostrados, bem como os índices I/E (quociente entre as médias aritméticas dos dados internos e externos) e as temperaturas do ar-condicionado nas salas climatizadas. Estes dados foram coletados na estação da primavera e a RE 09/2003 da ANVISA recomenda que a temperatura em ambiente interno no verão esteja compreendida entre 23 °C e 26 °C e no inverno entre 20 °C e 22 °C, limites destacados na Figura 25, que ilustra os valores de temperaturas internas e externas em um gráfico *boxplot*.

Figura 25 - Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de temperatura



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 11 - Médias, medianas, desvios e índices I/E das temperaturas monitoradas

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Temperatura do ar-condicionado (°C)	Dados internos			Dados externos			Índice I/E
				Média (°C)	Mediana (°C)	Desvio padrão	Média (°C)	Mediana (°C)	Desvio padrão	
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	23,0	23,96	24,20	0,60	32,89	33,20	1,25	0,73
		06/10/2014	23,0	21,98	22,00	1,26	27,70	29,30	3,48	0,79
		13/10/2014	25,0	24,68	24,90	0,60	35,47	35,40	3,65	0,70
		27/10/2014	22,0	22,77	22,50	0,88	27,31	29,40	3,94	0,83
	Sala D - DEQ	13/11/2014	24,0	26,07	26,20	0,90	24,15	23,40	3,06	1,08
		20/11/2014	23,0	26,30	26,60	0,69	26,99	26,50	2,85	0,97
		27/11/2014	23,0	25,17	25,30	0,48	24,24	24,40	1,54	1,04
		04/12/2014	24,0	25,21	24,90	0,98	25,35	26,10	1,95	0,99
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	-	27,21	25,90	1,90	25,81	25,50	2,45	1,05
		08/10/2014	-	25,33	25,60	1,88	26,33	26,30	2,92	0,96
		15/10/2014	-	31,78	32,30	1,61	33,99	33,20	3,15	0,94
		29/10/2014	-	26,26	26,60	2,58	25,53	27,30	3,82	1,03
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	-	27,76	27,40	0,99	28,31	27,10	1,73	0,98
		18/11/2014	-	25,40	25,20	1,41	28,30	28,60	5,80	0,90
		25/11/2014	-	25,37	25,60	1,11	24,40	24,90	1,72	1,04
		02/12/2014	-	24,37	24,40	0,63	23,88	24,00	2,01	1,02

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 25 nota-se que as temperaturas internas para as salas com ar-condicionado mantiveram suas medianas dentro do limite máximo previsto para o verão, exceto nos dias 13 e 20 de novembro na sala D (DEQ). Estes limites da ANVISA (RE 09/2003) são para ambientes climatizados artificialmente, mas foram adotados para critérios de comparação, assim, para as salas com ventilação natural o limite superior foi extrapolado pela mediana das temperaturas duas vezes na sala 102 do AT5 e apenas uma na sala 76 do AT4.

Observando os índices I/E, expostos na Tabela 11, nota-se que a sala climatizada 3 (DQ) foi a que apresentou menor faixa de valores, variando entre 0,70 e 0,83, ou seja, a temperatura média interna foi consideravelmente inferior à média externa. Nas demais salas os índices foram similares e próximos a uma unidade, variando de 0,90 a 1,08.

Em relação à temperatura que o ar-condicionado operava nas salas climatizadas pode-se constatar que esteve até 3,3 °C abaixo das temperaturas médias internas (por exemplo, no dia 20/11/2014 selecionou-se 23 °C, mas a média interna foi de 26,3 °C). Estes incrementos nas temperaturas no interior das salas se associam com processos inerentes ao metabolismo humano, pois o corpo humano troca calor com o ambiente através de processos como condução, irradiação e transpiração. A ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

NORMAS TÉCNICAS, 1980) estima que o calor liberado por uma pessoa em uma universidade é, em média, 113 kcal por hora.

Em São Carlos, a EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2015), em sua estação meteorológica (de coordenadas geográficas 21°57'42", latitude sul, e 47°50'28", longitude oeste) situada há 1,5 km da UFSCar, monitora os níveis diários de temperatura e para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro de 2014, as médias mensais foram, respectivamente, 21,6 °C; 23,3 °C; 22,6 °C e 22,7 °C. Embora experimentalmente as amostragens de temperatura tenham ocorrido somente 8 horas por dia, apenas para uma comparação superficial, verificou-se que as maiores médias externas também foram referentes a outubro, mês que marca o início do período chuvoso em São Carlos.

5.2.2 Umidade

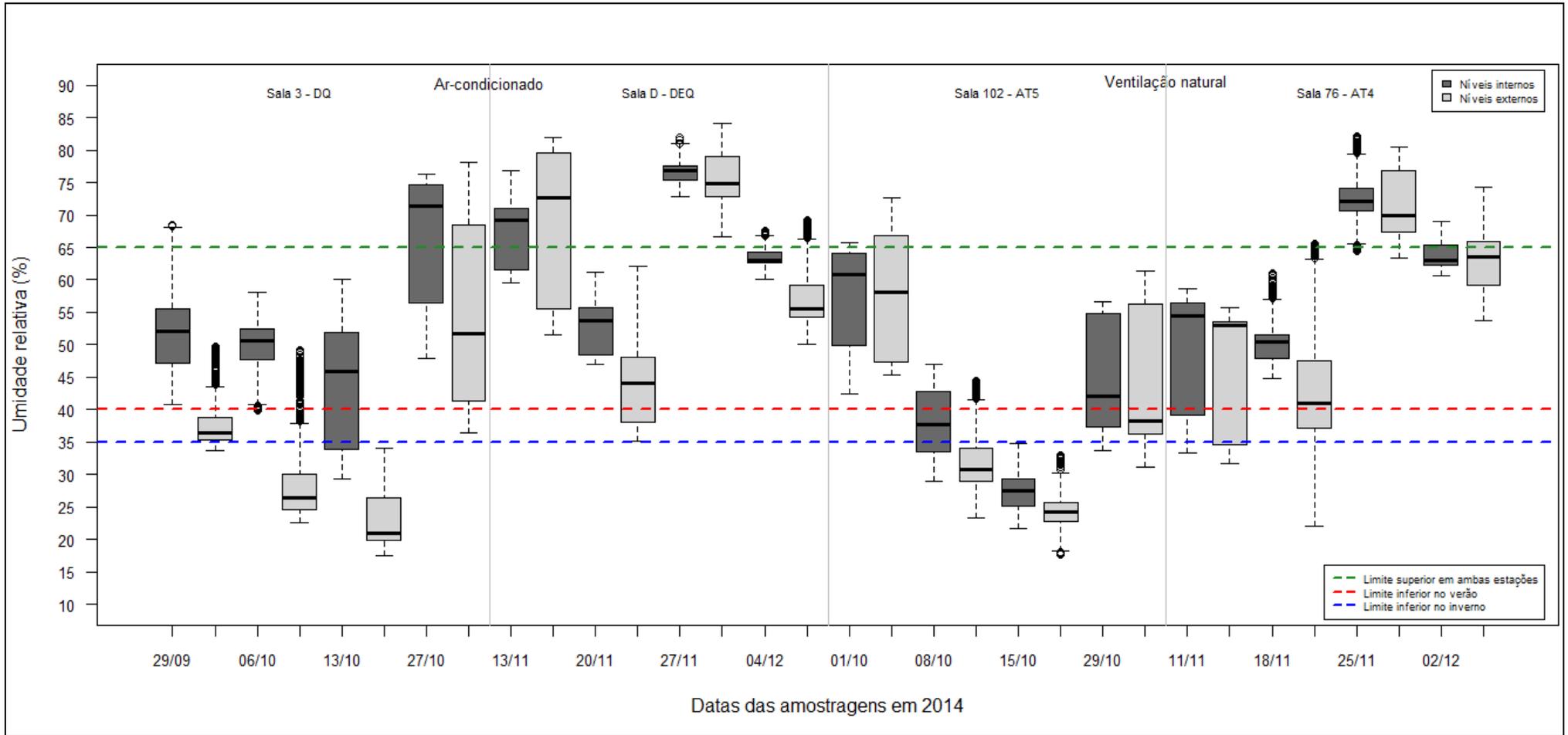
Os níveis de umidade relativa também foram monitorados com o equipamento EVM-7 e a Tabela 12 apresenta as médias aritméticas, medianas, desvios padrão e índices I/E dos valores amostrados e traz também os níveis de precipitação pluviométrica em cada data. Subsequentemente, na Figura 26, os dados ilustrados em um gráfico *boxplot*, no qual foram destacados os limites estabelecidos pela RE 09/2003 da ANVISA no verão (entre 40 e 65%) e no inverno (entre 35 e 65%), ressaltando novamente que o monitoramento ocorreu durante a primavera e que estes limites previstos são para ambientes climatizados, mas que neste trabalho também norteiam as comparações nos locais de ventilação natural.

Tabela 12 - Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de umidade relativa monitorados

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Precipitação pluviométrica (mm)	Dados internos			Dados externos			Índice I/E	
				Média (%)	Mediana (%)	Desvio padrão	Média (%)	Mediana (%)	Desvio padrão		
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	0,0	51,72	52,00	5,87	37,93	36,40	3,88	1,36	
		06/10/2014	0,0	50,13	50,70	3,87	29,48	26,40	7,44	1,70	
		13/10/2014	0,0	43,88	45,90	9,32	22,49	21,00	3,82	1,95	
		27/10/2014	52,0	66,01	71,40	9,35	54,63	51,70	14,32	1,21	
	Sala D - DEQ	13/11/2014	2,2	67,25	69,20	5,12	68,95	72,70	11,01	0,98	
		20/11/2014	0,0	52,73	53,80	3,94	44,53	44,10	7,77	1,18	
		27/11/2014	11,6	76,45	76,80	1,82	75,64	74,90	4,61	1,01	
		04/12/2014	0,0	63,66	63,00	1,64	57,16	55,60	5,09	1,11	
	Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	0,0	56,43	60,90	7,74	57,14	58,10	9,08	0,99
			08/10/2014	0,0	37,90	37,60	4,96	32,52	30,80	5,41	1,17
15/10/2014			0,0	27,55	27,40	2,97	24,21	24,30	2,98	1,14	
29/10/2014			0,0	45,75	42,00	8,59	45,28	38,30	10,51	1,01	
Sala 76 - AT4		11/11/2014	0,0	48,41	54,50	8,94	45,59	52,90	9,46	1,06	
		18/11/2014	0,0	50,28	50,50	3,04	42,26	41,00	10,07	1,19	
		25/11/2014	12,5	72,26	72,20	3,90	71,56	70,00	5,37	1,01	
		02/12/2014	0,0	63,87	63,00	1,90	63,27	63,60	5,35	1,01	

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26 - Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de umidade relativa



Fonte: Elaborada pela autora.

Observando a Figura 26 verifica-se que em quatro datas houve a extrapolação do valor máximo recomendado pela ANVISA de 65% de umidade para interiores e a partir dos dados da Tabela 12 constata-se com os valores de precipitação pluviométrica que houve a ocorrência de chuvas nestas datas, sendo um indício da influência nos níveis de umidade relativa do ar mesmo em ambientes climatizados por ar-condicionado. Apenas no dia 15 de outubro (sala 102 do AT5, ventilação natural) foram verificados valores medianos abaixo do limite mínimo recomendado para inverno (35%) e recorrendo a Figura 25 (ver subseção 5.2.1) é visível que nesta data foram obtidos os maiores valores para as temperaturas internas. Nota-se também que a tendência geral foi a obtenção de umidades internas superiores as externas, com índices I/E variando de 0,98 a 1,95, possivelmente devido a contribuições antropogênicas decorrentes de processos metabólicos como a transpiração e a respiração.

Os níveis de umidade externos podem ser comparados com as médias mensais disponibilizadas pela EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2015). Para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro de 2014, as médias mensais foram, respectivamente, 65,5%; 58,4%; 77,1% e 82,1%. Em consonância, experimentalmente obtiveram-se os menores níveis de umidade (inferiores a 35%) no mês de outubro e os maiores (acima de 60%) nos meses de novembro e dezembro.

É importante salientar que o controle da umidade do ar é imprescindível, pois conforme alerta Voltani (2009), nos ambientes internos, especialmente os climatizados artificialmente, umidade superior a 65% pode favorecer a proliferação de micro-organismos alergênicos ou patogênicos, enquanto níveis inferiores a 30% favorecem a irritação das mucosas nasais, contribuindo para o surgimento de alergias e infecções.

5.2.3 Conforto térmico, índice de calor e coeficientes de correlação

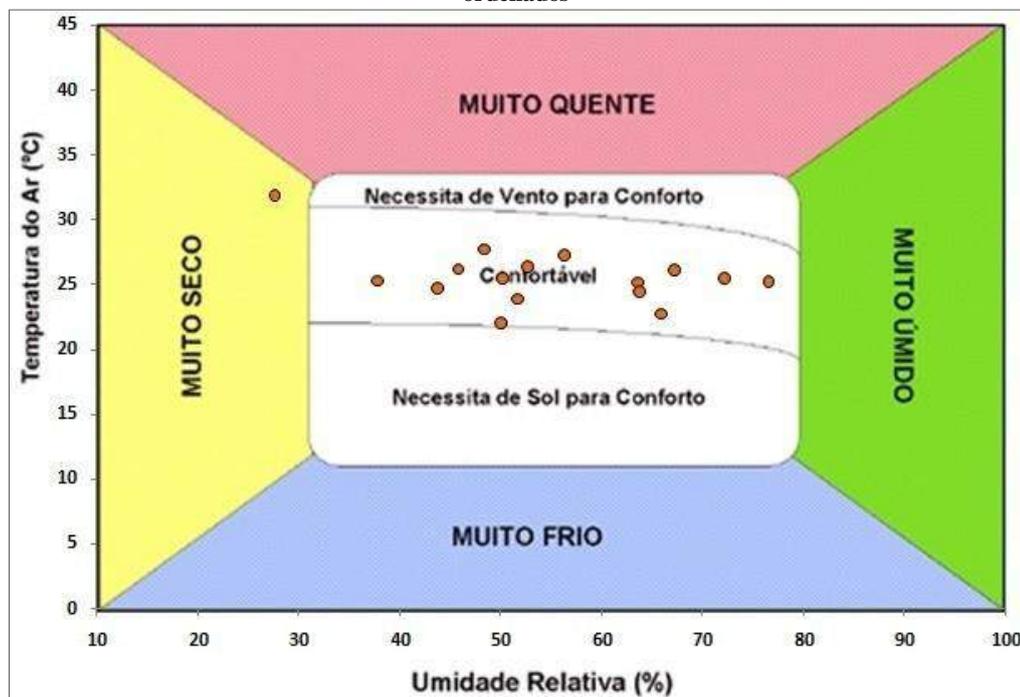
Somente com as informações sobre os níveis de temperatura e umidade terem ou não respeitado os limites estabelecidos e com a observância dos índices I/E, não é possível concluir se os alunos e professores foram expostos a situações de desconforto térmico, pois é muito difícil especificar condições ambientais que proporcionem sensação de conforto a todos, mas há condições que o fazem à maioria das pessoas.

Há várias definições e interpretações para o conforto térmico, dentre elas estão a da NBR 15220 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) que define como “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do

ambiente” e a da ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2004) cuja definição é “estado da mente que expressa a satisfação com o ambiente”.

Para entrar neste mérito de conforto humano, refletindo sobre os dados coletados de temperatura e umidade, pode-se fazer uso do Diagrama do Conforto Humano, preparado pela *World Meteorological Organization* (WMO) e veiculado pelo INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015c), apresentado na Figura 27, sobre o qual os dados internos de temperatura e umidade foram plotados como pares ordenados para verificar em quais amostragens ocorreram situações de desconforto nas salas de aula.

Figura 27 - Diagrama do Conforto Humano com os dados internos de temperatura e umidade plotados como pares ordenados



Fonte: Adaptação de figura disponível em INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2015c

Este diagrama apresenta a escala de umidade relativa no eixo das abscissas (horizontal), a escala de temperatura no eixo das ordenadas (vertical) e são as intersecções entre os valores dos eixos que indicam as faixas que podem proporcionar sensações de clima muito seco (área amarela), muito frio (área azul), muito úmido (área verde), muito quente (área rosa) e na região central do diagrama a área considerada confortável entre 30 e 80% de umidade concomitante com temperaturas em torno de 20 a 30 °C (área branca, faixa central), indicando nas faixas superior e inferior se é necessário vento ou sol para atingir a região confortável.

Para os dados plotados, verificou-se que das dezesseis amostragens, apenas uma não se enquadrou na região considerada confortável. Esta ocorrência foi correspondente ao dia 15 de outubro (sala 102 do AT5, ventilação natural), que apresentou temperatura média de 31,78 °C e umidade média de 27,55%, enquadrando-se como sensação de clima muito seco. Nas Figuras 25 e 26 (respectivamente nas subseções 5.2.1 e 5.2.2) é notável que nesta data obtiveram-se os maiores níveis de temperatura interna e os menores de umidade de todas as amostragens, pois de acordo com a Figura 18 (ver subseção 5.1.2) e o Anexo A, durante 17 dias não choveu na cidade de São Carlos, o último registro de chuvas havia sido no dia 28 de setembro.

Para o estudo do conforto térmico, além deste diagrama do INMET, pode-se quantificar o Índice de Calor (IC, do inglês *Heat Index*, HI) que representa uma medida que vem sendo utilizada pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA), dos Estados Unidos, para determinar a sensação térmica em locais estudados. Para o cálculo deste índice são considerados os valores de temperatura e umidade relativa do ar monitorados e os outros parâmetros considerados tem valores estabelecidos com base em estudos biometeorológicos (SCHORNOBAY, 2012), simplificando um modelo sintetizado na Equação 12, onde T representa as temperaturas médias em Fahrenheit (°F) e R os valores de umidade relativa percentuais.

$$\begin{aligned}
 IC = & -42,379 + 2,04901523.(T) + 10,14333127.(R) - 0,22475541.(T.R) \\
 & - 6,83783.10^{-3}.(T^2) - 5,481717.10^{-2}.(R^2) + 1,22874.10^{-3}.(T^2.R) \\
 & + 8,5282.10^{-4}.(T.R^2) - 1,99.10^{-6}.(T^2.R^2)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Os índices de calor (IC) calculados a partir dos valores médios internos de temperatura e umidade relativa encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Índices de calor calculados para os interiores monitorados

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Índice de calor (°F)	Índice de calor (°C)
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	77,66	25,37
		06/10/2014	76,88	24,93
		13/10/2014	78,13	25,63
		27/10/2014	75,71	24,28
	Sala D - DEQ	13/11/2014	81,11	27,29
		20/11/2014	80,46	26,92
		27/11/2014	79,12	26,18
		04/12/2014	79,16	26,20

Tabela 13 - Índices de calor calculados para os interiores monitorados (Continuação)

Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	82,53	28,07
		08/10/2014	78,40	25,78
		15/10/2014	86,57	30,32
		29/10/2014	79,86	26,59
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	82,50	28,06
		18/11/2014	79,06	26,14
		25/11/2014	79,63	26,46
		02/12/2014	77,80	25,44

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Conceição e Bitencourt (2006) e Peiter (2014), índices de calor (IC) inferiores a 27 °C não representam risco, enquanto valores compreendidos entre 27 e 32 °C merecem atenção, pois podem causar fadiga aos ocupantes do local se ficarem confinados por muito tempo ou estiverem realizando atividade física. Na Tabela 13, nota-se que nas salas climatizadas apenas uma amostragem teve IC enquadrado como estado de atenção, enquanto nas salas com ventilação natural o mesmo ocorreu três vezes, sendo o maior índice (30,32) referente ao dia 15 de outubro que foi enquadrado como sensação de clima muito seco pelo diagrama do INMET.

Outra análise que pode ser feita entre os valores de umidade relativa e temperatura é como eles se correlacionam, através dos coeficientes de correlação cruzada e p-valores associados, cujos resultados estão mostrados abaixo:

- interior - salas com ar-condicionado $\rightarrow r = 0,24$ (p-valor: 0,57)
- interior - salas com ventilação natural $\rightarrow r = -0,68$ (p-valor: 0,056)
- exteriores $\rightarrow r = -0,80$ (p-valor: 0,00017)

A obtenção de coeficiente de correlação cruzada negativo para os dados externos, associado a um baixíssimo p-valor, indica que altos valores de uma variável são concomitantes com valores baixos de outra, ou seja, altas temperaturas foram obtidas em dias de baixa umidade relativa do ar e vice-versa, comportamento observado também nos interiores das salas com ventilação natural. Em contrapartida, nas salas com ar-condicionado obteve-se correlação positiva que, embora tenha sido fraca (0,24 com p-valor 0,57), é um indício que baixas temperaturas se associam a baixos níveis de umidade do ar. Portanto, é fundamental que se atente para a manutenção da temperatura dos aparelhos de ar condicionado dentro de limites adequados para evitar sintomas físicos decorrentes da redução da umidade do ar como sensação de secura nas mucosas nasais e nos olhos.

5.3 Dióxido de carbono

As médias aritméticas, medianas, desvios padrão, diferença entre concentrações médias internas e externas (Δc) e índices I/E para os dados de concentração de CO₂, monitorados com o equipamento EVM-7, encontram-se na Tabela 14. A quantidade de pessoas (coluna “Qtde”) que estava presente durante as aulas também foi disponibilizada, pois como o CO₂ é produto da respiração humana, o número de ocupantes torna-se um dado importante.

Tabela 14 - Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de dióxido de carbono monitorados

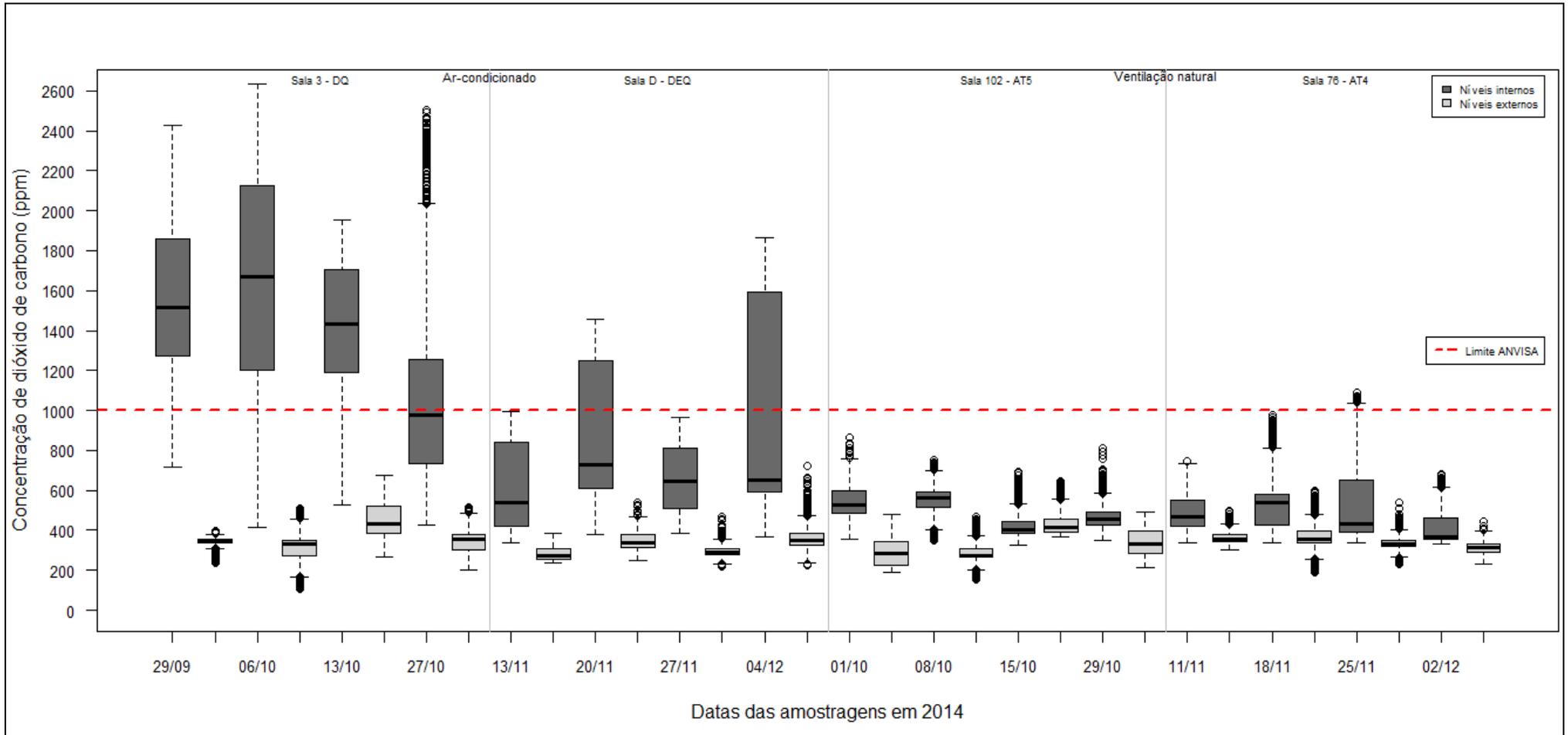
Tipo de ventilação	Local	Data	Qtde	Dados internos			Dados externos			Δc	Índice I/E
				Média (ppm)	Mediana (ppm)	Desvio padrão	Média (ppm)	Mediana (ppm)	Desvio padrão		
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/14	8	1563,41	1515,00	413,89	337,95	344,00	30,43	1225,45	4,63
		06/10/14	8	1629,39	1669,00	573,44	309,63	330,00	90,05	1319,76	5,26
		13/10/14	7	1411,08	1430,50	336,11	448,59	433,00	100,38	962,49	3,15
		27/10/14	8	1126,49	975,00	554,58	344,74	353,00	59,15	781,75	3,27
	Sala D - DEQ	13/11/14	8	616,08	540,00	214,77	283,22	271,00	31,43	332,87	2,18
		20/11/14	11	879,78	726,00	337,79	345,31	336,00	49,24	534,47	2,55
		27/11/14	8	658,17	643,00	168,64	293,44	293,00	30,49	364,73	2,24
		04/12/14	10	995,44	649,00	519,45	356,74	349,00	68,81	638,70	2,79
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/14	30	542,58	528,00	82,66	291,56	282,00	73,02	251,01	1,86
		08/10/14	31	546,99	560,00	76,67	289,06	274,00	50,52	257,92	1,89
		15/10/14	26	419,47	404,00	62,54	438,86	414,50	67,01	-19,39	0,96
		29/10/14	29	463,60	457,00	65,76	340,74	331,00	65,11	122,87	1,36
	Sala 76 - AT4	11/11/14	26	488,22	469,00	90,08	366,07	358,00	31,07	122,16	1,33
		18/11/14	18	550,65	538,00	153,58	366,50	355,00	83,09	184,14	1,50
		25/11/14	19	547,68	433,00	224,11	337,16	333,00	34,49	210,52	1,62
		02/12/14	17	421,19	370,00	100,12	314,69	314,00	27,92	106,51	1,34

Fonte: Elaborada pela autora.

A RN 02/2003 da ABRAVA expõe que a concentração média de CO₂ no ar exterior normalmente é da ordem de 350 ppm, porém pode alcançar 500 ppm em áreas urbanas de tráfego veicular intenso. Observando a Tabela 14 é possível verificar que foram obtidos valores externos médios acima de 350 ppm, mas todos foram inferiores a 500 ppm, apesar do grande fluxo de veículos na região da UFSCar.

A distribuição das concentrações de CO₂ foi ilustrada no gráfico *boxplot* da Figura 28, na qual o limite interno previsto pela ANVISA foi destacado.

Figura 28 - Boxplot comparativo das concentrações internas e externas de CO₂



Fonte: Elaborada pela autora.

A ABRAVA recomenda que a diferença entre as concentrações médias interna e externa seja inferior a 700 ppm, porém através da coluna “ Δc ” da Tabela 14 verifica-se que este valor foi ultrapassado em todas as amostragens na sala 3 (DQ), que possui ar-condicionado, indicando que as concentrações internas foram muito superiores as externas, fato verificado também pela observância dos índices I/E que variaram entre 3,15 e 5,26, ou seja, as concentrações internas foram aproximadamente de 3 a 5 vezes maiores que as externas. Na outra sala climatizada (sala D – DEQ) foram obtidos valores internos, em média 2,5 vezes, superiores aos externos, fato visualizável na Figura 28, enquanto nas salas com ventilação natural o maior índice I/E foi 1,89 e o menor foi 0,96 (único inferior a 1,00) observado no dia 15 de outubro, data de valores atípicos para outros parâmetros, tendo sido classificada como clima muito seco pelo Diagrama do Conforto Humano (ver subseção 5.2.3.).

A RE 09/2003 da ANVISA recomenda 1.000 ppm como o valor máximo para a concentração de CO₂ em ambientes internos, valor que foi excedido nas amostragens da sala 3 (DQ), entretanto os valores médios internos de todas as salas foram inferiores ao limite da ABRAVA que é de 3.500 ppm. Apesar disto, a ABRAVA faz uma ressalva que concentrações superiores a 1.500 ppm devem ser evitadas em ambientes ocupados por pessoas sedentárias inativas, pois tendem a provocar relevante sonolência e redução da produtividade. Logo, é recomendável que nos ambientes internos seja evitada a saturação do ar por este gás, facilitando a troca de ar com o ambiente externo através de uma taxa de ventilação adequada, assunto que será discutido na subseção 5.5.

Os altos níveis de CO₂ nas salas podem ser derivados do próprio metabolismo humano, pois este composto é produto da respiração e em interiores com muitas pessoas confinadas é esperado um aumento em sua concentração, principalmente nos locais de climatização artificial, que em geral carecem de uma renovação de ar apropriada. No entanto, o CO₂ só se torna fatal ao ser humano em concentrações extremamente elevadas, em torno de 30.000 ppm para exposição de 10 min, causando asfixia por deslocar o oxigênio (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2001).

O coeficiente de correlação cruzada entre os dados internos de CO₂ e o número de ocupantes nas salas resultou em 0,70 com p-valor de 0,0021, comprovando a esperada associação entre estas variáveis, pois uma correlação positiva indica que a variação na quantidade de pessoas interfere diretamente na concentração de CO₂ interna.

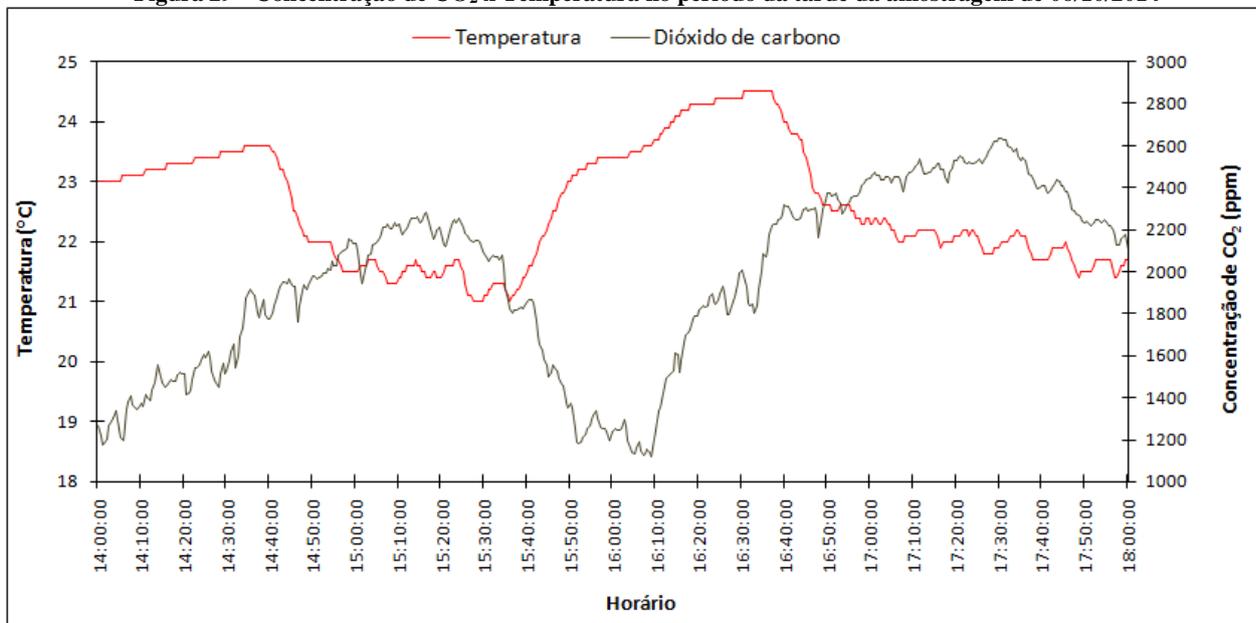
Um tema frequentemente debatido em pesquisas científicas de diversas áreas é a correlação entre as concentrações de CO₂ e os níveis de temperatura. Estudos como os realizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2014) estimam que

entre 4 e 16 ppm de aumento na concentração de dióxido de carbono atmosférico há o acréscimo de 1 °C na temperatura. Assim, para verificar a relação entre essas duas variáveis monitoradas, calcularam-se os coeficientes de correlação cruzada:

- exteriores $\rightarrow r = 0,80$ (p-valor: 0,00023)
- interior - salas com ar-condicionado $\rightarrow r = -0,74$ (p-valor: 0,036)
- interior - salas com ventilação natural $\rightarrow r = -0,42$ (p-valor: 0,30)

A correlação positiva obtida para os dados externos indica que a variação de um desses parâmetros acompanha a variação linear no outro, por exemplo, valores altos de temperatura se associam com altas concentrações de CO₂, diagnóstico consonante com estudos como o do IPCC e vários outros que associam esta correlação com fenômenos ambientais como o efeito estufa. No entanto, para os interiores, os coeficientes foram negativos e os p-valores associados indicaram relevância estatística (p-valor < 0,05) apenas para as salas com ar-condicionado, sugerindo que baixas temperaturas se associaram a altas concentrações do gás e vice-versa. Para visualizar este comportamento, construiu-se o gráfico da Figura 29, no qual os dados plotados referem-se ao dia 06/10/2014 (sala 3 do DQ com ar-condicionado) entre 14 e 18h, data da obtenção da maior média para a concentração interna do gás (1629,39 ppm) e da menor média para a temperatura interna (21,98 °C).

Figura 29 - Concentração de CO₂ x Temperatura no período da tarde da amostragem de 06/10/2014



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 29 nota-se que às 14:00, quando as aulas do período da tarde se iniciaram, a concentração interna de CO₂ começou a aumentar (produto da respiração dos ocupantes), enquanto a temperatura decaía, pois, o ar-condicionado foi ligado. Em torno das

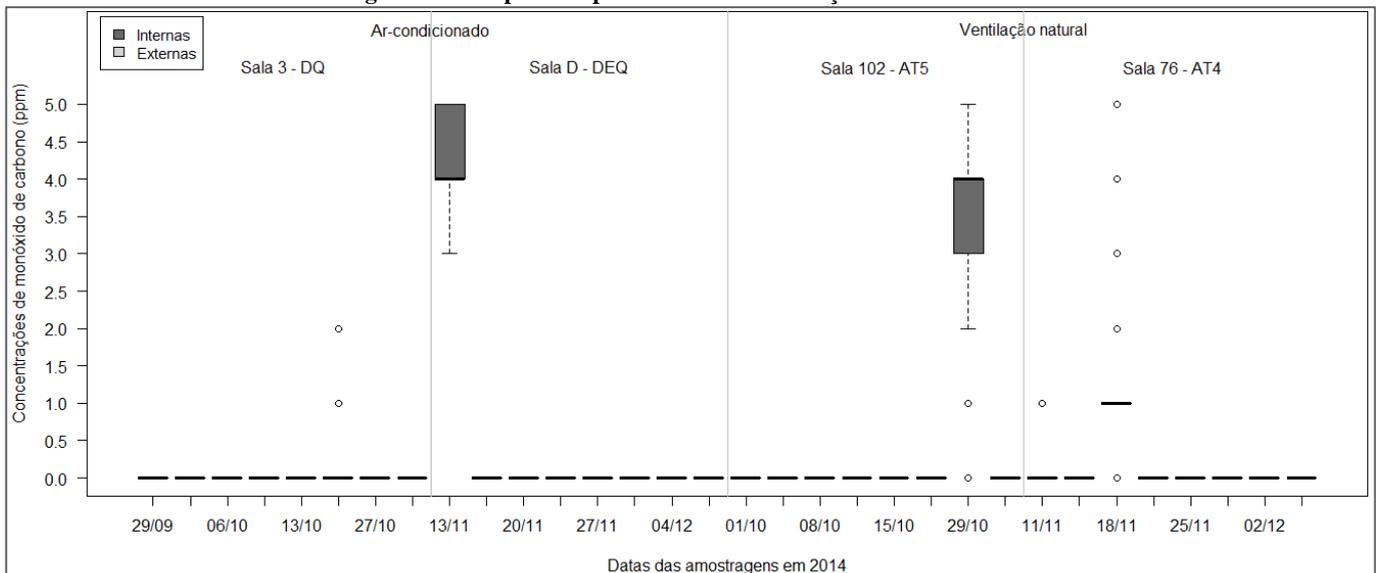
15:40, horário de intervalo entre as aulas, nota-se que na sala vazia com o ar-condicionado desligado a concentração do gás diminuiu, enquanto a temperatura aumentou. Às 16:00 quando se encerra o intervalo, com o retorno dos alunos e acionamento do aparelho de ar condicionado, novamente aumentou a concentração de dióxido de carbono, enquanto a temperatura interna reduziu, comprovando a correlação negativa, ou seja, a tendência de obtenção de valores inversamente proporcionais para estas variáveis.

Outro fator que pode influir nesta correlação negativa nas salas climatizadas é a emissão de CO₂ pelos próprios aparelhos de ar condicionado, pois enquanto trabalham para refrigerar um ambiente, os equipamentos liberam certa quantidade de dióxido de carbono dentro do local climatizado (WEB AR CONDICIONADO, 2015). Assim, quanto menor a temperatura de operação, maior será a concentração de gás liberado.

5.4 Monóxido de carbono e compostos orgânicos voláteis

As concentrações de monóxido de carbono (CO) e de compostos orgânicos voláteis (COVs) foram monitoradas com o equipamento EVM-7 e estão apresentadas nos gráficos *boxplot* das Figuras 30 e 31, respectivamente.

Figura 30 - Boxplot comparativo das concentrações internas e externas de CO

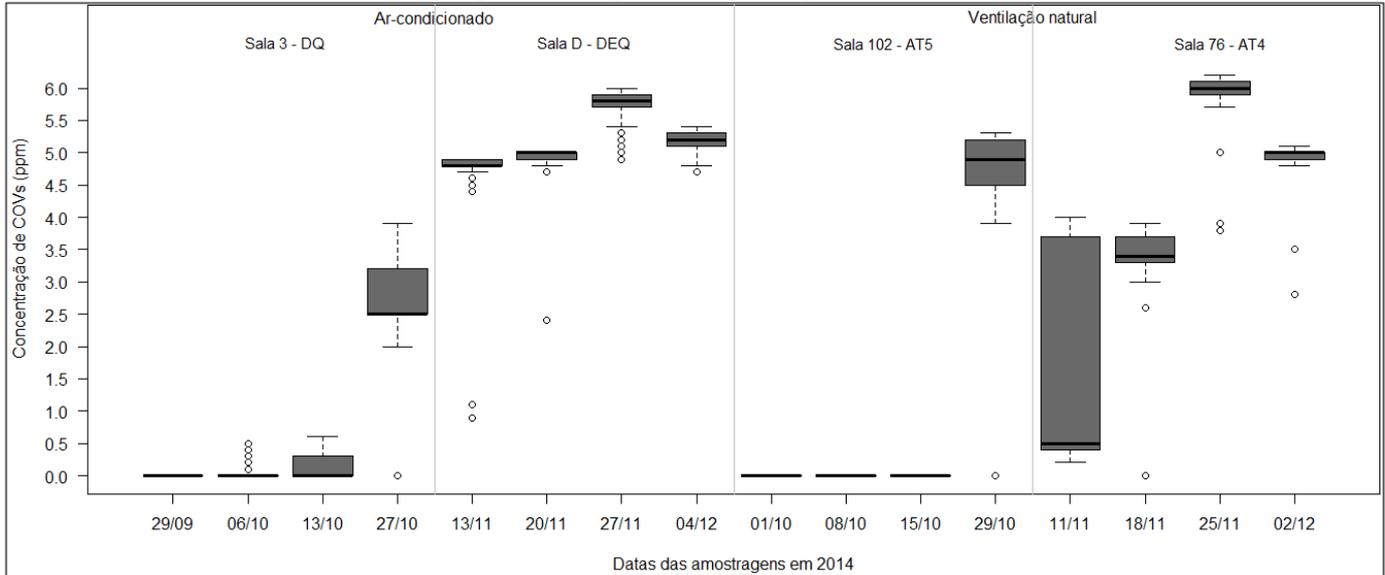


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 30 verifica-se que todas as concentrações de CO foram menores ou iguais a 5,0, portanto inferiores aos padrões adotados (BRASIL, 1978 e SÃO PAULO, 2013; ver Quadro 4 na subseção 3.4). Notavelmente apenas nos dias 29/10 e 13/11 os valores variaram o suficiente para a obtenção de *boxplot*, entretanto verifica-se que as medianas foram coincidentes com limites dos quartis. Na maioria das datas apenas valores iguais a 0 ppm foram obtidos, este fato não significa que não possa haver CO nos ambientes, mas sim

que, se estiver presente, as concentrações não estão na faixa de partes por milhão (ppm), unidade do limite de detecção do equipamento. Peiter (2014) monitorou CO no interior de um ônibus na cidade de São Carlos e verificou picos de até 7,8 ppm, todavia as concentrações médias também foram baixas, na faixa entre 0,1 e 1,1 ppm.

Figura 31 - Boxplot das concentrações internas de COVs



Fonte: Elaborada pela autora.

Sobre a Figura 31 é importante destacar que logo nos primeiros monitoramentos o sensor de COVs do EVM-7 utilizado externamente começou a apresentar problemas, porém devido à impossibilidade de retirar o equipamento para manutenção, pois o mesmo era utilizado para outros parâmetros, apenas os dados internos foram considerados.

Na Figura 31 verifica-se que os maiores picos para COVs foram de 6 ppm, com valores abaixo do limite de detecção (0,01 ppm) para as primeiras semanas de coleta. No trabalho de Peiter (2014) verificou-se que as concentrações variaram de 0,2 a 12 ppm. Gioda e Aquino Neto (2003) destacaram que, para as concentrações de COVs, os limites nacionais sugeridos são $500 \mu\text{g m}^{-3}$ ($\cong 250$ ppb ou 0,250 ppm) e os internacionais são $300 \mu\text{g m}^{-3}$ ($\cong 150$ ppb ou 0,150 ppm).

Cada sala de aula foi monitorada quatro vezes e no último monitoramento de cada uma utilizou-se o analisador CMS para amostrar as concentrações de monóxido de carbono e ozônio (O_3). Como o equipamento permite apenas medições pontuais, nas datas selecionadas, ele era utilizado antes do início das aulas pela manhã (08:00), no intervalo entre as aulas da manhã e da tarde (13:00) e ao término das aulas da tarde (18:00).

Os *chips* para CO tinham faixa de detecção de 5 a 150 ppm (menor faixa existente para este modelo de equipamento) e todas as concentrações ficaram abaixo do limite de detecção (< 5 ppm), condizente com os resultados do EVM-7.

Para o O₃, a faixa de medição era de 25 a 1.000 ppb (único *chip* que operava na faixa de ppb) e os resultados encontram-se na Tabela 15, onde a designação “< 25” indica que a concentração esteve abaixo do limite de detecção do *chip*.

Tabela 15 - Concentrações de ozônio monitoradas pontualmente

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Dados internos (ppb)			Dados externos (ppb)		
			08:00	13:00	18:00	08:00	13:00	18:00
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	27/10/2014	< 25	< 25	< 25	26,8	< 25	38,0
	Sala D - DEQ	04/12/2014	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25
Ventilação natural	Sala 102 - AT5	29/10/2014	< 25	54,0	41,0	< 25	56,0	90,0
	Sala 76 - AT4	02/12/2014	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	25,1

Fonte: Elaborada pela autora.

A RE 03/1990 do CONAMA (BRASIL, 1990) estabelece como padrão primário e secundário para a emissão de ozônio em exteriores o valor de 160 $\mu\text{g m}^{-3}$ para amostragens de 1 hora. Este valor equivale a, aproximadamente, 80 ppb (0,080 ppm), logo, na Tabela 15, verifica-se que no exterior da sala 102 foi obtida uma única concentração pontual superior a este limite (90 ppb às 18h).

A obtenção de concentrações de ozônio externas superiores a 25 ppb nas datas de 27/10 e 29/10 pode estar relacionada com uma forte chuva com incidência de raios ocorrida no dia 27 de outubro (52 mm de precipitação pluviométrica, ver Anexo A), pois esta condição meteorológica instável é capaz de produzir ozônio na baixa atmosfera. Além disso, outra consideração importante é que o ozônio troposférico pode provir de locais distantes da fonte geradora, pois pode se dispersar até centenas de quilômetros e seu tempo de residência na atmosfera varia entre 5 e 100 dias, dependendo da latitude, altitude e estação do ano (NEVES, 2009).

5.5 Taxas de ocupação e de ventilação

Para obter a taxa de ocupação é necessário calcular o quociente entre a área da sala de aula selecionada e o número de pessoas que frequentaram as aulas. A Tabela 16 traz todos os parâmetros necessários para este cálculo, ressaltando que o número de pessoas (alunos + professor) refere-se à média aritmética dos presentes durante as quatro semanas de monitoramento e que na subseção 4.1 as salas de aula encontram-se planejadas nas Figuras 4, 5, 6 e 7. É interessante destacar que somente a sala 3 (DQ) tem formato diferenciado, o de trapézio retângulo, as demais salas são retangulares.

Tabela 16 - Taxas de ocupação calculadas para as salas de aula monitoradas

Tipo de ventilação	Ambiente	Dimensões (m)		Área (m ²)	Nº de carteiras	Nº de pessoas	Taxa de ocupação (m ² /pessoa)	
		Comprimento	Altura(s)				Máxima (área/carteiras)	Real (área/pessoas)
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	5,60	3,80 e 2,50	17,64	21	8	0,84	2,20
	Sala D - DEQ	7,00	3,30	23,10	33	9	0,70	2,57
Ventilação natural	Sala 102 - AT5	9,80	3,70	36,26	61	29	0,59	1,25
	Sala 76 - AT4	6,30	3,70	23,31	45	20	0,52	1,16

Fonte: Elaborada pela autora.

A RN 02/2003 da ABRAVA estipula, que a densidade de ocupação desejada em salas de aula é de no máximo 50 pessoas a cada 100 m², ou seja, almeja-se no mínimo 2 m²/pessoa. Na Tabela 16 nota-se que apenas nas salas com ar-condicionado este padrão foi respeitado e um fato preocupante é que nenhuma das salas estava em sua lotação máxima, pois se todas as carteiras disponíveis estivessem ocupadas todas as taxas de ocupação seriam inferiores a 0,84 m²/pessoa.

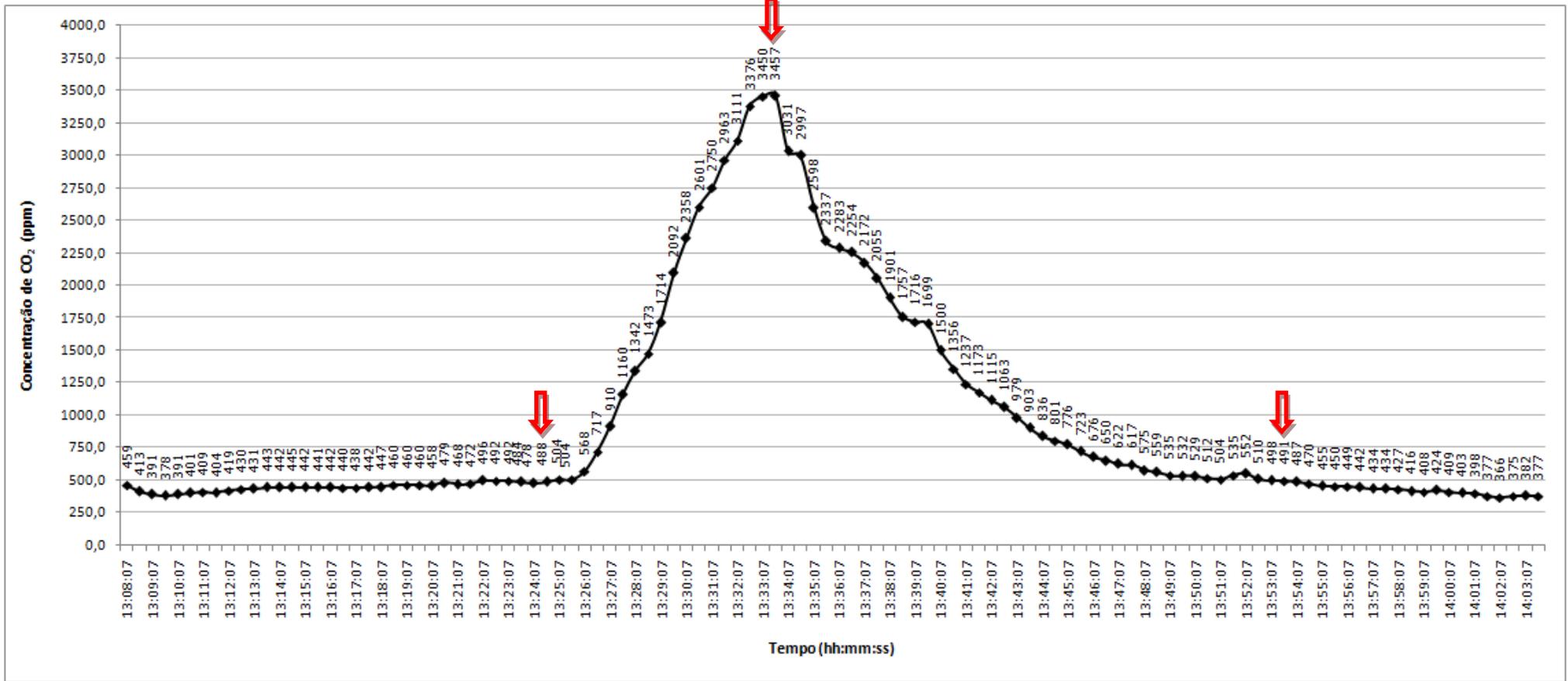
Utilizando a metodologia adaptada de Heinsohn e Cimbala (2003) descrita no trabalho de Nascimento (2011) efetuou-se a análise das taxas de ventilação nas salas de aula. O monitoramento das concentrações foi iniciado antes da inserção de dióxido de carbono com o cilindro para que fossem registradas as condições padrões de cada local. Neste primeiro momento, nas salas climatizadas artificialmente o ar-condicionado foi mantido desligado.

Após a estabilização das medidas, obtidas com o amostrador EVM-7, com as portas e janelas fechadas, foi liberada uma quantidade de gás proveniente do cilindro e nas salas climatizadas ligou-se o ar-condicionado que foi mantido em 23°C.

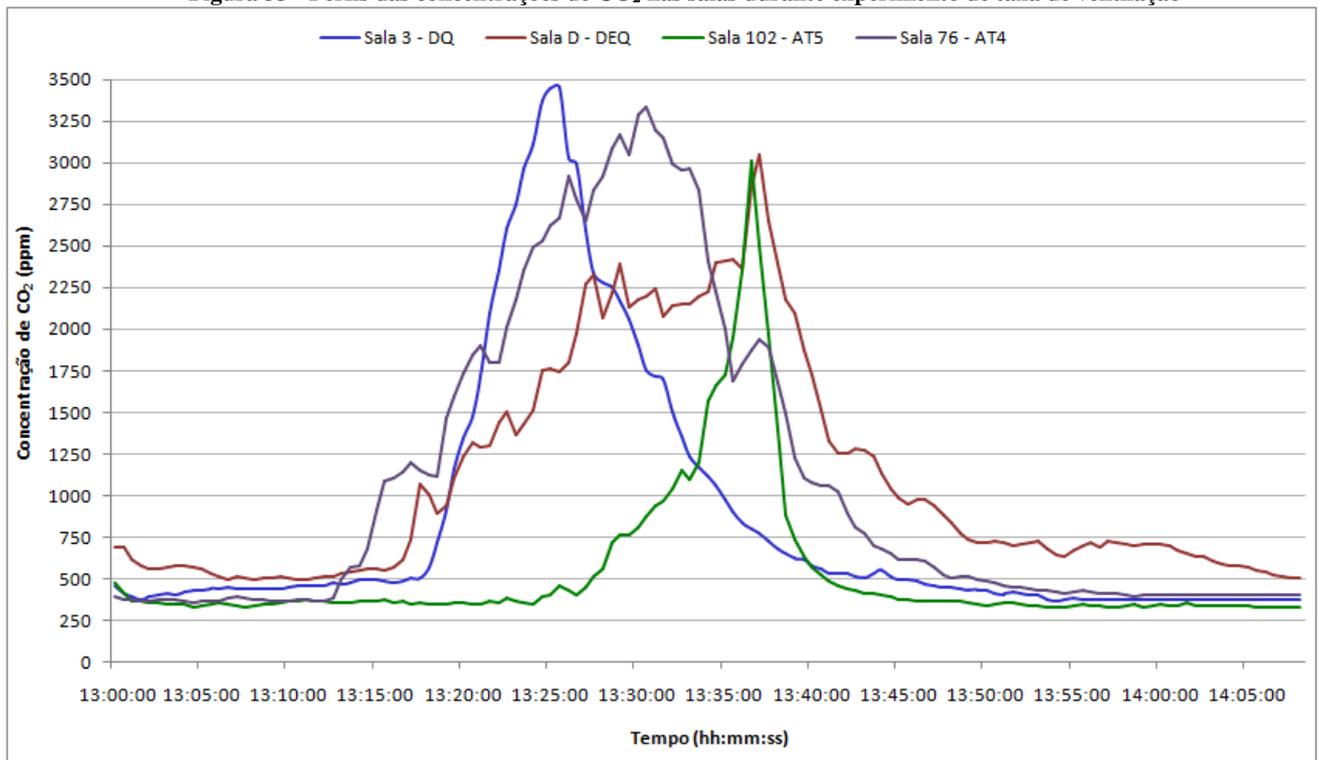
Acompanhou-se o aumento da concentração do gás no ambiente e após atingir um pico superior a 3.000 ppm (valor escolhido relevando os maiores níveis de CO₂ durante as semanas de monitoramento) as janelas e porta foram abertas (cada sala possuía uma única porta e as janelas eram do tipo vitrô basculante localizadas em toda extensão da parede oposta à porta) e nas salas climatizadas o ar-condicionado foi desligado. Assim, com a renovação do ar as concentrações de CO₂ foram diminuindo até retornar aos níveis basais.

A Figura 32 mostra detalhadamente o perfil de concentração de CO₂ obtido para a sala 3 (DQ) onde foram destacados os valores selecionados como c_e , c_0 e c_t para aplicação na Equação 8 (ver subseção 4.5) que obtém a taxa de ventilação, em função do tempo de decaimento da concentração de CO₂. Todos os demais perfis das concentrações durante estes experimentos encontram-se na Figura 33, sendo importante citar que não havia alunos ou professores presentes para não ocorrer interferência de emissões antropogênicas do gás.

Figura 32 - Concentrações de CO₂ para determinação da taxa de ventilação da sala 3 (DQ) com os pontos c_e, c₀ e c_i destacados



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 33 - Perfis das concentrações de CO₂ nas salas durante experimento de taxa de ventilação

Fonte: Elaborada pela autora.

A Tabela 17 mostra os valores selecionados para o cálculo da vazão afluyente de cada sala, relacionando o tempo considerado (entre a obtenção de c_0 e o retorno à concentração basal), a concentração de CO₂ na corrente de entrada (c_e), o pico de concentração (c_0) e a concentração ao final do tempo decorrido (c_t , que representa o retorno à concentração basal, ou seja, próxima a de entrada).

Tabela 17 - Dados utilizados para a determinação da taxa de ventilação nas salas estudadas

Tipo de ventilação	Ar-condicionado		Ventilação natural	
	Sala 3 - DQ	Sala D - DEQ	Sala 102 - AT5	Sala 76 - AT4
Ambiente				
Volume da sala (m³)	70,56	159,39	250,19	158,51
t (min)	20	28	30	27
c_e (ppm)	488,0	555,0	282,0	382,0
c₀ (ppm)	3457,0	3480,0	3181,0	3333,0
c_t (ppm)	491,0	570,0	283,0	396,0
Q (m³ min⁻¹)	24,33	30,02	66,49	31,41
Q (L s⁻¹)	405,65	500,38	1108,32	523,65
Nº de pessoas	8	9	29	20
Taxa de ventilação (L s⁻¹ por pessoa)	50,71	55,60	38,22	26,18
Nº de carteiras	21	33	61	45
Taxa de ventilação (Ocupação máxima)	19,32	15,16	18,17	11,64

Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação à taxa de ventilação ideal, a RN 02/2003 da ABRAVA recomenda para salas de aula o valor mínimo de $7,5 \text{ L s}^{-1}$ por pessoa, que nas condições dos experimentos seria respeitado tanto para o número real de pessoas que frequentavam as salas como para a hipotética situação de ocupação máxima (considerando a quantidade de carteiras disponíveis).

É interessante notar que as salas não eram todas do mesmo tamanho e distinguiam também no número de ocupantes. Porém, se for reconsiderada a Figura 28 (ver subseção 5.3) é possível verificar que a sala que apresentou os maiores níveis de CO_2 durante as amostragens foi a sala 3 (DQ), que tem as menores dimensões e possuía a menor quantidade de alunos, mas segundo a Tabela 17 seriam necessários apenas 20 minutos para que concentrações acima de 3.000 ppm retornassem a níveis abaixo de 500 ppm, se o aparelho de ar condicionado fosse desligado e as janelas e porta mantidas abertas para promover a troca de ar com o exterior, renovando assim o ar interno.

O experimento de taxa de ventilação, além de permitir discutir sobre a possibilidade de adequação aos níveis da ABRAVA, também é um alerta que uma importante medida corretiva e preventiva para evitar altos índices de CO_2 é permitir a renovação do ar confinado, especialmente nas salas climatizadas artificialmente. Assim, essas taxas de ventilação obtidas só corresponderão a situações reais nas salas de aula se for mantido o cuidado de deixar portas e janelas abertas durante alguns minutos, mesmo que apenas nos intervalos de aula. Mas é importante salientar que esta medida poderá trazer inconvenientes como o aumento nas concentrações internas de poluentes gerados externamente, conforme alertam Jurado, Bankoff e Sanchez (2014).

Sobre as salas climatizadas, um alerta importante foi feito por Cozac (2015) que considera uma “catástrofe em relação à qualidade do ar interna” a utilização de aparelhos de ar condicionado do tipo *split* em ambientes escolares. Segundo o autor, este tipo de aparelho, que representa 90% das vendas no Brasil, é indicado para uso apenas em ambientes residenciais, pois não possui filtragem adequada e nem renovação de ar. Assim, a utilização em outros interiores sem as adaptações necessárias, resulta em diversos ambientes com instalações irregulares, fora das normas técnicas e legislações brasileiras. Portanto, esta informação ratifica a necessidade de permitir a troca de ar entre ambientes internos e externos das salas monitoradas da UFSCar.

5.6 Ruídos

As médias aritméticas, medianas, desvios padrão, e índices I/E para os dados de pressão sonora, indicativa do nível de ruído, monitorados com os decibelímetros no decorrer das aulas encontram-se na Tabela 18 e foram ilustrados no gráfico *boxplot* da Figura 34, na qual os limites previstos pela ABNT para interior e exterior de salas de aula foram destacados. Na Tabela 18 foi inclusa uma coluna intitulada “Salas vazias” que se refere à média aritmética resultante dos dados coletados durante meia-hora com os ambientes vazios, antes da entrada dos alunos no período da manhã, mantendo o aparelho de ar condicionado ligado nas salas climatizadas e as portas e janelas abertas naquelas com ventilação natural.

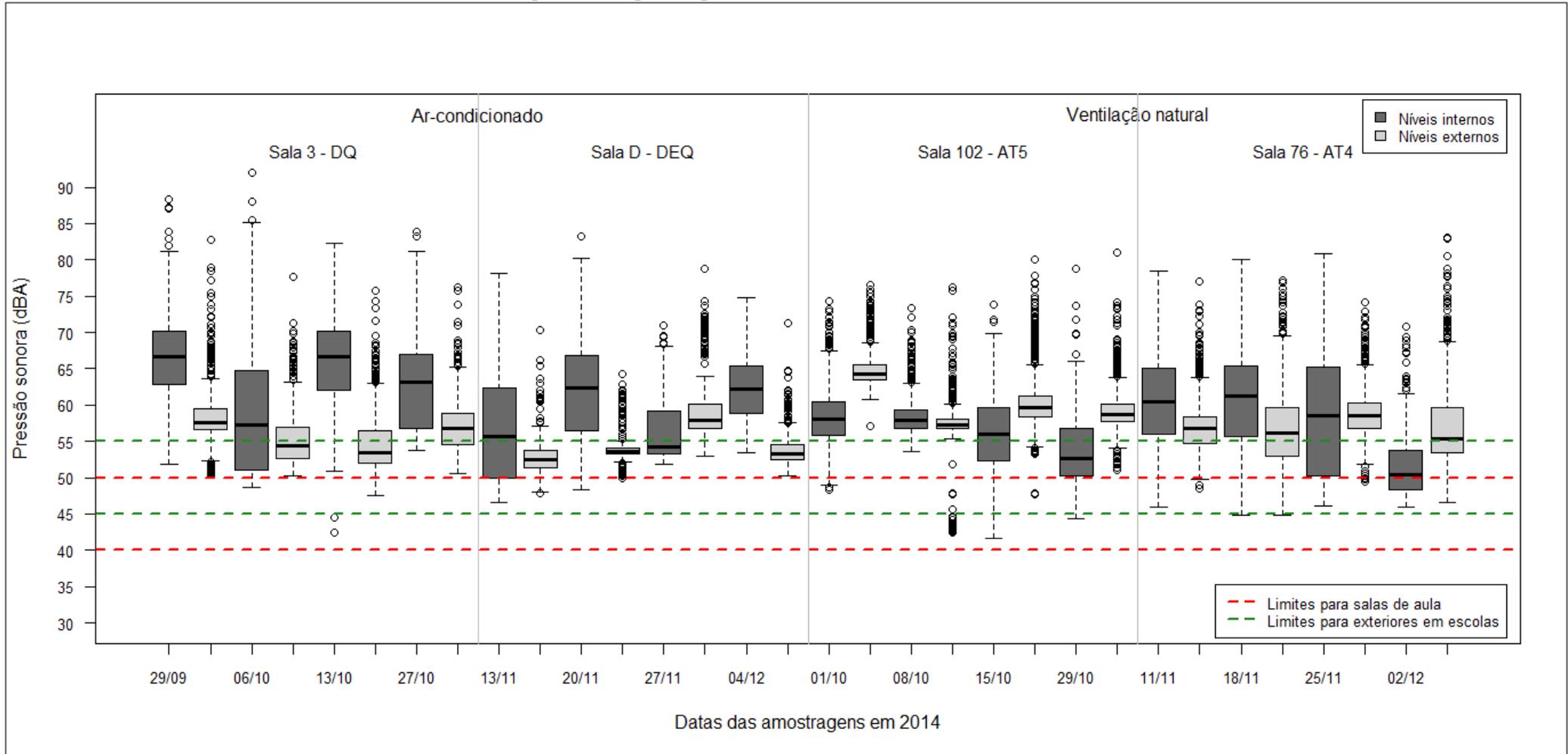
Tabela 18 - Médias, medianas, desvios e índices I/E dos níveis de ruído monitorados

Tipo de ventilação	Ambiente	Salas Vazias (dBA)	Data	Dados internos			Dados externos			Índice I/E
				Média (dBA)	Mediana (dBA)	Desvio padrão	Média (dBA)	Mediana (dBA)	Desvio padrão	
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	47,23	29/09/2014	66,16	66,70	6,42	58,41	57,50	4,15	1,13
			06/10/2014	58,90	57,30	8,74	55,32	54,40	3,72	1,06
			13/10/2014	65,59	66,70	6,72	54,79	53,50	4,24	1,20
			27/10/2014	62,82	63,10	5,95	56,99	56,70	3,39	1,10
	Sala D - DEQ	52,78	13/11/2014	56,32	55,70	6,63	52,94	52,50	2,81	1,06
			20/11/2014	62,26	62,40	6,24	54,22	53,60	2,31	1,15
			27/11/2014	56,20	54,20	3,99	60,50	57,90	5,45	0,93
			04/12/2014	61,97	62,20	4,93	53,69	53,30	1,95	1,15
Natural	Sala 102 - AT5	44,46	01/10/2014	58,31	58,00	4,18	64,66	64,20	2,09	0,90
			08/10/2014	58,27	57,90	2,61	57,43	57,20	3,43	1,01
			15/10/2014	56,17	56,00	4,91	60,35	59,60	4,10	0,93
			29/10/2014	53,74	52,60	4,50	59,41	58,70	3,05	0,90
	Sala 76 - AT4	38,57	11/11/2014	60,19	60,40	6,46	57,06	56,80	3,77	1,06
			18/11/2014	59,83	61,20	7,49	56,31	56,10	6,05	1,06
			25/11/2014	58,47	58,50	7,90	58,90	58,60	3,46	0,99
			02/12/2014	51,66	50,40	4,42	57,15	55,40	5,62	0,90

Fonte: Elaborada pela autora.

Observando a Tabela 18 nota-se que mesmo quando as salas estão vazias os níveis de ruídos apresentaram médias elevadas, especialmente nas salas com ar-condicionado ligado. Os índices I/E comprovam que os níveis médios internos foram superiores aos externos em 87,5% das amostragens nas salas climatizadas, contrapondo aos 37,5% nas salas ventiladas naturalmente. Isto mostra a contribuição dos ruídos gerados pelo próprio funcionamento dos aparelhos de ar condicionado nos níveis internos, infringindo a faixa permissível de 35 a 45 dBA prevista para salas de aula vazias que possuam sistema de condicionamento de ar instalado, segundo a NBR 6401 da ABNT.

Figura 34 - Boxplot comparativo dos níveis internos e externos de ruídos



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 34 é possível verificar que em todas as amostragens internas as medianas dos níveis de ruído superaram o limite estabelecido pela ABNT na NBR 10152/1987 que estipula a faixa de 40 a 50 dB para o interior das salas de aula, enquanto para os exteriores a recomendação é de 45 a 55 dB e apenas 31,25% das amostragens externas (5/16) estiveram enquadradas nesta faixa ideal.

Outros trabalhos desenvolvidos em ambientes escolares de São Carlos (NASCIMENTO, 2008; COMIN, 2012) também diagnosticaram que os níveis internos de ruídos ultrapassaram o limite máximo da ABNT para salas de aula.

É importante destacar que em ambientes escolares os níveis de ruídos toleráveis são mais baixos do que aqueles previstos para outros tipos de interiores. Por exemplo, a NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 1978), em seu Anexo 1, estipula que para níveis de ruído contínuo ou intermitente de até 85 dBA, o tempo de exposição máxima diária é de 8 horas. Apenas para critérios de comparação, na Figura 34 verifica-se que apenas valores *outliers* em duas amostragens apresentaram níveis superiores a 85 dBA.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos parâmetros monitorados internamente neste trabalho foram comparados com os valores estipulados nas normas adotadas como referenciais e as conclusões encontram-se sintetizadas no Quadro 8, tendo sido instituído que o parâmetro seria avaliado como inadequado a partir de 50% dos dados além dos limites estabelecidos.

Cabe a ressalva que os limites previstos pela OMS e CETESB (SÃO PAULO, 2013) são para amostragens de 24 horas em exteriores e os estipulados pela ANVISA e ABRAVA são para ambientes climatizados artificialmente, porém, como já mencionado neste texto, não há normas brasileiras para interiores de ventilação natural nem para tempos de amostragem inferior (cada monitoramento teve duração de 8h).

Quadro 8 - Comparação dos resultados das amostragens internas com as legislações pertinentes

Parâmetros	Norma/Referência	Valor máximo recomendado (VMR)	Avaliação geral		Observações
			Salas com ar-condicionado	Salas com ventilação natural	
MP _{2,5}	OMS (2005) CETESB (2013)	25 µg m ⁻³	Adequado	Adequado	Em apenas uma data para uma das salas com ar-condicionado foi extrapolado.
MP ₁₀	OMS (2005) CETESB (2013)	50 µg m ⁻³	Adequado	Adequado	Não foi ultrapassado o VMR.
MPT	ABRAVA (RN 02/2003) ANVISA (RE 09/2003)	60 µg m ⁻³ 80 µg m ⁻³	Adequado	Adequado	Não foi ultrapassado o VMR.
Temperatura	ANVISA (RE 09/2003)	23 a 26 °C (verão) 20 a 22 °C (inverno)	Adequado	Inadequado	O VMR para verão foi superado pelas temperaturas médias em 50% das amostragens nas salas com ventilação natural.
Umidade	ANVISA (RE 09/2003)	40 a 65% (verão) 35 a 65% (inverno)	Adequado	Adequado	Nos dois tipos de sala não houve extrapolação em 50% das amostragens.
CO ₂	ANVISA (RE 09/2003)	1.000 ppm	Inadequado	Adequado	Em metade das coletas de dados as concentrações médias nas salas com ar-condicionado superaram o VMR.
CO	Ministério do Trabalho (NR 15/1978)	39 ppm (até 48 h/semana)	Adequado	Adequado	Todos os valores foram inferiores a 5 ppm, sendo a maioria das médias iguais a 0 ppm.
Ruído	ABNT (NBR 10152/1987)	40 a 50 dBA	Inadequado	Inadequado	Em todas as amostragens os valores médios encontraram-se fora da faixa recomendada.

Quadro 8 - Comparação dos resultados das amostragens internas com as legislações pertinentes (Continuação)

Parâmetros	Norma/ Referência	Valor mínimo recomendado	Avaliação geral		Observações
			Salas com ar- condicionado	Salas com ventilação natural	
Taxa de ocupação	ABRAVA (RN 02/2003)	2 m ² /pessoa	Adequado	Inadequado	As taxas para as salas ventiladas naturalmente foram inferiores ao valor recomendado como mínimo adequado.
Taxa de ventilação	ABRAVA (RN 02/2003)	7,5 L s ⁻¹ por pessoa	Adequado	Adequado	Todos os valores obtidos nos experimentos realizados foram superiores ao mínimo recomendado.

Fonte: Elaborado pela autora.

Pelo Quadro 8 verifica-se que entre os dez parâmetros apresentados o único inadequado para ambos os tipos de salas foi o nível de ruído, enquanto as salas climatizadas com ar-condicionado apresentaram concentrações de CO₂ elevadas e para as salas ventiladas naturalmente estiveram em discordância com as normas os níveis de temperatura e as taxas de ocupação calculadas. As outras principais conclusões deste trabalho estão elencadas a seguir.

Pelos índices I/E concluiu-se que, no geral, as concentrações internas foram superiores as externas ($I/E > 1,0$) para todas as frações de particulados nas salas com ventilação natural, tendo o mesmo ocorrido para a fração MP_{2,5} nas salas com ar-condicionado, porém para MPT o inverso ocorreu e para MP₁₀ metade das amostragens apresentaram este comportamento. Para todas as frações, as concentrações internas foram maiores nas salas ventiladas naturalmente e este fato se associou à utilização de giz e apagadores nas lousas e à contribuição de fontes externas pela troca de ar facilitada com as portas e janelas abertas.

Concluiu-se que, em média, o MP₁₀ era composto por mais de 50% em massa de MP_{2,5}, enquanto o MPT possuía mais de 70% de MP₁₀ e que, para ambos os tipos de sala estudados, todas as frações de MP apresentaram correlação negativa com os índices de precipitação pluviométrica (em média $r = -0,40$) evidenciando que a ocorrência de chuvas interferiu discretamente na redução das concentrações de particulados.

As análises das membranas que coletaram MP por ICP-MS e ICP-OES detectaram 27 elementos químicos e todas as frações de particulados tiveram em comum Al, Ca, Fe e S como os majoritários e Cd, Ga, La, Pr, Sb e Y como os metais de menores

concentrações. Elevadas concentrações de cálcio foram obtidas e inclusive foi o elemento contaminante dos brancos de campo nas salas com ventilação natural, demonstrando novamente que a utilização de giz nestes ambientes tem importante relevância nas concentrações de particulados e em sua composição. Possíveis fontes externas que contribuíram para as concentrações de Al, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Pb, S, Sr, Ti e Zn foram emissão de indústria de produção de tintas, emissão veicular, ressuspensão de solo em vias pavimentadas, solo de terra exposta, queima de vegetação rasteira e de cana-de-açúcar.

A temperatura e a umidade relativa, algumas vezes ultrapassaram as faixas recomendadas pela ANVISA (RE 09/2003) e como avaliação geral os níveis de temperatura foram classificados como inadequados para as salas com ventilação natural. Entretanto, segundo o diagrama de conforto humano do INMET, em apenas uma data (em sala de ventilação natural) foi constatada situação de desconforto classificada como sensação de clima muito seco, possuindo também o maior índice de calor calculado.

As altas concentrações de CO₂ verificadas nos interiores climatizados (até 5 vezes superiores às externas) são resultantes de emissões antropogênicas, pois o gás é produto da respiração humana, e demonstram a deficiência na renovação do ar nestes locais que permanecem fechados por muito tempo devido ao funcionamento dos aparelhos de ar condicionado, que também emitem este gás enquanto estão operando.

Os níveis de ruído extrapolaram em todo período amostrado a faixa limítrofe, consistindo em um relevante problema, especialmente nas salas climatizadas, pois mesmo com elas desocupadas obtiveram-se altos níveis provenientes do funcionamento do ar-condicionado.

A obtenção de índices I/E superiores a 1,0 para umidade, CO₂ e ruídos indica que os níveis dentro das salas de aula são mais elevados do que no ambiente externo. Para a temperatura nas salas ventiladas naturalmente constatou-se que as temperaturas internas eram superiores às externas, tendo o inverso ocorrido nas salas climatizadas, fato consonante ao objetivo esperado com o uso de ar-condicionado que é o controle da temperatura interna.

Não há normas oficiais para COVs totais e todas as concentrações foram inferiores a 6 ppm. A metodologia adicional para medição de ozônio constatou muitos valores abaixo do limite de detecção do equipamento e das concentrações relevantes apenas uma de 90 ppb no exterior, excedeu o limite previsto pelo CONAMA (80 ppb) e pode ter sido decorrente de uma forte tempestade com raios ocorrida em São Carlos.

As taxas de ocupação inadequadas para as salas ventiladas naturalmente apontam para a necessidade de que a quantidade de alunos por turma seja revista, pois se todas as carteiras disponíveis estivessem ocupadas teriam sido obtidos valores inadequados para todas as salas de aula monitoradas.

Os experimentos de taxa de ventilação apontaram que seriam necessários entre 20 e 30 minutos para que elevadas concentrações de CO₂ reduzissem significativamente, retornando a níveis toleráveis, se as portas e janelas das salas fossem mantidas abertas. Esta conclusão serve como alerta que uma importante medida corretiva e preventiva para evitar altos índices de CO₂ é permitir a renovação do ar confinado, especialmente nas salas climatizadas artificialmente que apresentaram concentrações inadequadas para este gás e foi observado que elas eram destrancadas imediatamente antes do início das aulas e fechadas logo após o término, impossibilitando trocas de ar eficientes nos períodos em que o ar-condicionado estava desligado.

No entanto, há uma importante ressalva que merece destaque: a adoção de medidas simples como a abertura de janelas e portas para a renovação e troca de ar entre ambientes auxiliaria de forma eficiente na dispersão de alguns poluentes gasosos, na prevenção de situações de desconforto térmico ou causado por altas concentrações de CO₂, mas poderia gerar inconvenientes como o aumento nas concentrações internas de poluentes de origem externa transportados pelo vento como, por exemplo, os particulados e também maior interferência dos ruídos externos.

Outras sugestões que podem melhorar a qualidade do ar nos interiores monitorados seriam a substituição das lousas de giz nas salas de ventilação natural e a certificação de que todas as adequações necessárias para instalação de ar-condicionado tipo *split* nas salas de aula climatizadas tenham sido efetuadas (pois este tipo de aparelho é indicado apenas para uso residencial) e que estejam operando de acordo com as especificações da NBR 16401/2008 da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), com adequadas manutenções periódicas, incluindo limpeza dos filtros, sempre respeitando o tempo de vida útil do aparelho.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O monitoramento da qualidade do ar de interiores requer uma série de cuidados e há muitas dificuldades para sua execução, sendo as principais: a pesagem das membranas que necessita de algum dispositivo para desagregar carga eletrostática (eletrodo universal ou sistema de ionização com elementos radioativos como o polônio), o acondicionamento das membranas para evitar contaminações, o transporte dos pesados equipamentos para a realização das coletas, a resistência dos ocupantes de um ambiente em autorizar a avaliação do mesmo, além da limitada quantidade de trabalhos sobre a temática, que dificulta contextualizações, comparações estatísticas e previsões de consequências para saúde humana, bem como a ausência de legislações específicas para diferentes ambientes internos. Neste contexto, a expansão do tema e aumento de pesquisas na área são fundamentais para subsidiar discussões enriquecedoras que podem prever níveis adequados para os parâmetros de interesse e gerar novas normas técnicas para interiores.

Para futuros trabalhos em ambientes escolares sugere-se:

- o monitoramento de mais salas com ventilação exclusivamente natural para ampliar os dados que podem sugerir se os padrões existentes para poluentes em locais com climatização artificial podem ser adotados como referências ou se a criação de novos padrões seria mais adequada;
- incluir o monitoramento de bioaerossóis, especialmente análise de fungos e bactérias, por sua contribuição no desenvolvimento de doenças em ambientes confinados;
- ampliar o período de monitoramento comparando os níveis nas estações seca (de abril a setembro) e chuvosa (de outubro a março) especificamente na cidade de São Carlos, ou comparando as diferentes estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em outros municípios com características climatológicas distintas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **PORTARIA n° 3523**. Brasília, 1998. 11 p.

_____. **RE 176**: padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, 2000. 14 p.

_____. **RE 9**: qualidade do ar ambiental interior. Brasília, 2003. 10 p.

ALBUQUERQUE, E. L. **Compostos orgânicos voláteis na atmosfera urbana da região metropolitana de São Paulo**. 2007. 547 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2007.

ALVES, R. **Avaliação da qualidade do ar em escolas fundamentais da cidade de Colombo através de material particulado em suspensão e sua relação com a indústria local de cal**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Universidade Positivo, Curitiba, 2009.

ALVES, L. A. B. **Avaliação da qualidade ambiental de estabelecimentos comerciais da região central de São Carlos, SP**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

AMARAL, B. S. **Caracterização química de material particulado (PM₁₀) coletado em pontos estratégicos da região metropolitana do Rio de Janeiro**. 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Standard 62**: Ventilation for acceptable indoor air quality. Califórnia, 2001. 187 p.

_____. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Califórnia, 2004. 19 p.

ARATO, E. N. **Som e ruídos**. Bauru: UNESP/CTI, 2002. 11 p. Apostila da disciplina Higiene Industrial e Segurança do Trabalho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6401**: Instalações centrais de ar-condicionado para conforto – parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro, 1980. 17 p.

_____. **NBR 10151**: avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade - procedimento. Rio de Janeiro, 2000. 4 p.

_____. **NBR 10152**: níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1987. 4 p.

_____. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003. 7 p.

_____. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Partes 1, 2 e 3. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO (ABRAVA). **RN 02**: sistemas de condicionamento de ar e ventilação para conforto, qualidade do ar interior. São Paulo, 2003. 18 p.

AVIGO JÚNIOR, D. **Qualidade do ar em escolas de Curitiba**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Universidade Positivo, Curitiba, 2008.

BARTLETT, K. H.; KENNEDY, S. M.; BRAUER, M.; VAN NETTEN, C.; DILL, B. Evaluation and a predictive model of airborne fungal concentrations in school classrooms. **The Annals of Occupation Hygiene**, Oxford, v. 48, n. 6, p. 547-55, 2004.

BAYER, C. W.; CROW, S. A.; FISCHER, J. Causes of indoor air quality problems in schools: summary of scientific research. Inc. for the Energy Division, **Oak Ridge National Laboratory**, Columbia, v. 1, p. 1-72, 2000.

BIBLIOTECA COMUNITÁRIA (BCo). **Relatório de atividades**: BCo (2014). São Carlos: UFSCar/BCo, 2015.

BOTKIN, D. B.; KELLER, E. A. **Ciência Ambiental**: Terra, um planeta vivo. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 681 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **RE 005**. Brasília, 1989. 4 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **RE 003**. Brasília, 1990. 5 p.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria GM nº 3214, de 8 de junho de 1978. **NR 15** – Atividades e operações insalubres. Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no trabalho. Brasília, 1978. 85 p.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO). **NHO 03** – Análise gravimétrica de aerodispersóides sólidos coletados sobre filtros de membrana. Norma de Higiene Ocupacional – Método de ensaio. Brasília, 2001. 33 p.

BRICKUS, L. S. R.; AQUINO NETO, F. R. A qualidade do ar de interiores e a química. **Química Nova**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 65-74, 1999.

BRUNO, R. L. **Material particulado na cidade de São Carlos-SP: quantificação e identificação de fontes**. 2005. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

CELLI, C. E. **Monitoramento do material particulado respirável suspenso na atmosfera do centro da cidade de São Carlos – SP**. 1999. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999.

COMIN, T. T. **Identificação da contribuição das fontes de material particulado atmosférico de São Carlos através do Software CMB8**. São Carlos: UFSCar/Departamento de Engenharia Química, 2007. 24 p. Relatório de Iniciação Científica.

_____. **Evolução temporal na emissão de material particulado na cidade de São Carlos II: Influência de fatores locais**. São Carlos: UFSCar/Departamento de Engenharia Química, 2009. 20 p. Relatório de Iniciação Científica.

_____. **Monitoramento ambiental em uma escola da cidade de São Carlos-SP: ênfase em qualidade do ar interior**. 2012. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CONCEIÇÃO, R. A. F.; BITENCOURT, D. P. Análise de um período quente no estado de Santa Catarina através do cálculo do índice de calor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV, 2006, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=1&totalRows_Recordset_busca=1006&cgid=14>. Acesso em: 12 fev. 2015.

COSTA, E. V. Medidas da umidade relativa do ar em um ambiente fechado. **Revista Brasileira de Física**. Porto Alegre, v. 25, n. 3, p. 346-348, 2003.

COZAC, L. **A qualidade do ar nas salas de aula está sendo negligenciada?** Disponível em: <http://conforlab.com.br/conteudo_artigo.php?id=29>. Acesso em 21 dez. 2015.

EHLERS, R. S. **Análise de séries temporais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná/ Departamento de Estatística, 2003. 53 p. Apostila.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Dados meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/dados-meteorologicos>>. Acesso em: 04 fev. 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Particulate Matter (PM-10)**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/pm10.html>>. Acesso em: 09 dez. 2014.

_____. **Air Quality: revision to definition of Volatile Organic Compounds - exclusion of 4 compounds**. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/caaa/t1/fr_notices/e4cccvoc_pr.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

_____. **Noise Pollution**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/clean-air-act-overview/title-iv-noise-pollution>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

ESTATCAMP - Consultoria em estatística e qualidade. **Software Action: Boxplot**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/estatistica-basica/31-boxplot>>. Acesso em: 17 dez. 2014.

_____. **Software Action: Cálculo e interpretação do p-valor**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/512-calculo-e-interpretacao-do-p-valor>>. Acesso em: 02 abr. 2015.

FENSKE, J. D.; PAULSON, S. E. Human breath emissions of VOCs. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 49, p. 594-598, 1999.

GIODA, A.; AQUINO NETO, F. R. Poluição química relacionada ao ar de interiores no Brasil. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 359-365, 2003.

GODWIN, C.; BATTERMAN, S. Indoor air quality in Michigan schools. **Indoor Air**, Dinamarca, v. 17, p. 109-121, 2007.

GOOGLE MAPS. **Foto de satélite da área norte da UFSCar**. Disponível em: <<https://maps.google.com.br/maps/mm>>. Acesso em 14 fev. 2015.

HARGREAVES, M.; PARAPPUKKARAN, S.; MORAWSKA, L.; HITCHINS, J.; HE, C.; GILBERT, D. A pilot investigation into associations between indoor airborne fungal and non-biological particle concentrations in residential houses in Brisbane, Australia, **Sci. Total Environ.**, v. 312, p. 89-101, 2003.

HEINSOHN, R. J., CIMBALA, J. M. **Indoor Air Quality Engineering – Environmental Health and Control of Indoor Pollutants**. Marcel Dekker, INC, University Park, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, U.S.A. 2003.

HESTER, R. E.; HARRISON, R. Volatile organic compounds in the atmosphere, **The Royal Society of Chemistry**, v. 4, p. 109-124, 1995.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology**: properties, behavior and measurement of airborne particles. 2 ed. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1999. 483 p.

INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY. **Humidity: Measurement Principle**. Disponível em: <<http://www.ist-usadivision.com/sensors/humidity/>>. Acesso em: 15 fev. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 22 jan. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**: Precipitação pluviométrica para a estação de São Carlos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera_serie_txt.php?&mRelEstacao=83726&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=01/09/2014&mRelDtFim=31/12/2014&mAtributos=,,,,,,1,,,,,>. Acesso em: 20 jan. 2015. a.

_____. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**: Velocidade e direção dos ventos para a estação de São Carlos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera_serie_txt.php?&mRelEstacao=83726&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=01/09/2014&mRelDtFim=31/12/2014&mAtributos=,,,,,,1,,,,,>. Acesso em: 19 mar. 2015. b.

_____. **Diagrama do conforto humano**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima/conforto_term/>. Acesso em: 25 mar. 2015. c.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Properties of CO₂ and carbon-based fuel**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/specialreports/srccs/srccs_annex1.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2014.

ITO, L. X. **Monitoramento da qualidade do ar de ambientes internos - bibliotecas**. 2007. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

JURADO, S. R.; BANKOFF, A. D. P.; SANCHEZ, A. Indoor air quality in Brazilian universities. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 11, p. 7081-7093, 2014.

KAWAMOTO, M. S. **Monitoramento ambiental e higiene ocupacional em uma indústria química da cidade de São Carlos – SP: ênfase em qualidade do ar interior**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

KLICK EDUCAÇÃO. **Corpo humano**. Disponível em: <http://www.klickeducacao.com.br/Klick_Portal/Enciclopedia/images/Co/6956/2526.jpg>. Acesso em 15 nov. 2015.

LEE, J. D. **Química Inorgânica não tão concisa**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 527 p.

LEE, S. C.; CHANG, M. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. **Chemosphere**, v. 41, p. 109-113, 2000.

LOGAN, W. P. D. Mortality in the London fog incident. **Lancet**, v.1, p.336-338, 1953.

MAROCO, J. **Análise Estatística de dados: com utilização do SPSS**. Lisboa: Edições Sílabos, 2003.

MARQUES, K. A. **Caracterização do material particulado suspenso na atmosfera da cidade de São Carlos (SP)**. 2000. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

MATEUS, V. L. **Caracterização inorgânica de material particulado (PTS e PM_{2,5}) coletado próximo a um importante complexo industrial na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. 197 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **Indoor Air**, Dinamarca, v. 15, p. 27-52, 2005.

MESQUITA, M. S.; ARAÚJO, F. M. Diagnóstico da qualidade do ar interno das edificações do campus da Unifor. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 27, n. 2, p. 163-170, dez. 2006.

MOORE, D. S. **A estatística básica e sua prática**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 658 p.

MORAIS, G. R.; SILVA, M. A.; CARVALHO, M. V.; SANTOS, J. G. S.; DOLINGER, E. J. O.; BRITO, D. D. Qualidade do ar interno em uma instituição de ensino superior brasileira. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 305-310, mar./abr. 2010.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5 ed. São Paulo: Saraiva, 2002. 526 p.

MORTIMER, E. F.; AMARAL, L. O. F. Quanto mais quente melhor: calor e temperatura no ensino de Termoquímica. **Química Nova na Escola**. São Paulo, n. 7, p. 30-34, 1998.

NASCIMENTO, G. C. **Avaliação da qualidade do ar em ambientes internos**: salas de aula. São Carlos: USP/Departamento de Engenharia Ambiental, 2008. 156 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

_____. **Avaliação da qualidade do ar em ambientes internos**: biblioteca pública. 2011. 190 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

NEVES, N. M. S. **Formação e dispersão de ozônio na região do Recôncavo Baiano**. 2009. 158 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air quality guidelines for Europe**. 2 ed.. Copenhagen, 2000. 288 p.

_____. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**: Global update 2005. Copenhagen, 2006. 22 p.

PEGAS, P. N.; EVTYUGINA, M. G.; ALVES, C. A.; NUNES, T.; CERQUEIRA, M.; FRANCHI, M.; PIO, C. Outdoor/indoor air quality in primary schools in Lisbon: a preliminary study. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 5, p. 1145-1149, 2010.

PEITER, F. S. **Avaliação da qualidade ambiental interna no transporte coletivo da cidade de São Carlos, SP.** 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PERSILY, A. K. The relationship between indoor air quality and carbon dioxide. In: INDOOR AIR , 2, 1996, Nagoya - Japão. **Anais...** Nagoya: 1996, p. 961-966.

POZZA, S. A. **Identificação das fontes de poluição atmosférica na cidade de São Carlos-SP.** 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

_____. **Características temporais da concentração de material particulado na atmosfera da cidade de São Carlos-SP.** 2009. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

RIOS, A. L. **Efeito tardio do ruído na audição e na qualidade do sono em indivíduos expostos a níveis elevados.** 2003. 155 f. Dissertação (Mestrado em Biociências Aplicadas à Clínica Médica) - Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2003.

ROTIROTI, A. S. **Monitoramento da qualidade ambiental no mercado municipal da cidade de São Carlos, SP: material particulado em suspensão, temperatura, umidade e ruído.** 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SAMOHYL, R. W. **Ferramentas estatísticas em controle estatístico de qualidade.** Disponível em: <http://previsaosimples.pbworks.com/f/CAP_12_Correlação.doc>. Acesso em 17 dez. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Padrões Estaduais de Qualidade do Ar - Decreto Estadual nº 59.113 de 23/04/2013.** São Paulo, 2013. 19 p.

SCHORNOBAY, E. **Caracterização de ambientes internos da região central de São Carlos/SP: material particulado e poluição sonora.** 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SHAUGHNESSY, U. H.; MOSCHANDREAS, D. J.; SHAUGHNESSY, R. J. Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. **Indoor Air**, Dinamarca, v. 21, p. 121-131, 2011.

SILVA, L. M. **Avaliação da qualidade ambiental: mercado municipal de São Carlos/SP**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, M. C. Meio ambiente como fator limitante no desempenho do trabalho e segurança do trabalhador. **Revista Caderno Informativo de Prevenção de Acidentes**. São Paulo, n. 183, p. 32-40, 1995.

SKC. **Personal Environmental Monitor for measurement of PM₁₀ and PM_{2,5} in indoor air**. Disponível em: <<http://www.skcinc.com/instructions/1367.pdf>>. Acesso em 15 fev. 2014.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 836 p.

TURIEL, I.; HOLLOWELL, C. D.; MIKSCH, R. R.; RUDY, J. V.; YOUNG, R. A. The effects of reduced ventilation on indoor air quality in an office building. **Atmospheric Environment**, v. 17, p. 51-64, 1983.

UCHIYAMA, S.; ASAI, M.; HASEGAWA, S. A sensitive diffusion sampler for the determination of volatile organic compounds in ambient air. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 12, p. 1913-1920, 1999.

UEDA, A. C. **Estudo de compostos orgânicos voláteis na atmosfera da região metropolitana de Campinas**. 2010. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCar). **A Universidade**. Disponível em: <<http://www2.ufscar.br/aufscar/auniversidade.php>>. Acesso em 14 fev. 2014.

VOLTANI, E. R. **Avaliação do conforto térmico em indústrias de calçados**. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

WEB AR CONDICIONADO. **Ar condicionado e o sono excessivo no trabalho**. Disponível em: <<http://www.webarcondicionado.com.br/ar-condicionado-e-o-sono-excessivo-no-trabalho>>. Acesso em 19 dez. 2015.

APÊNDICE A - Concentrações de MP calculadas para as membranas utilizadas no monitoramento em 2014

Tabela A1 - Dados para obtenção das concentrações de MP_{2,5}

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Dados internos					Dados externos					Índice I/E
			m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	0,0538669	0,0539674	0,0001006	4120	24,41	0,0548885	0,0549476	0,0000591	3800	15,54	1,57
		06/10/2014	0,0539674	0,0540365	0,0000691	5010	13,79	0,0549476	0,0550108	0,0000632	4930	12,83	1,07
		13/10/2014	0,0543015	0,0544387	0,0001372	4900	28,00	0,0540271	0,0541101	0,0000831	4860	17,09	1,64
		27/10/2014	0,0544387	0,0544646	0,0000260	4900	5,30	0,0541101	0,0541379	0,0000278	4870	5,70	0,93
	Sala D - DEQ	13/11/2014	0,0555707	0,0556137	0,0000431	5510	7,81	0,0573832	0,0574462	0,0000631	5570	11,32	0,69
		20/11/2014	0,0556137	0,0556559	0,0000422	5120	8,25	0,0574462	0,0574738	0,0000276	5160	5,35	1,54
		27/11/2014	0,0543328	0,0543790	0,0000462	5016	9,21	0,0575001	0,0575289	0,0000289	4860	5,94	1,55
		04/12/2014	0,0543790	0,0544131	0,0000341	5680	6,00	0,0575289	0,0575626	0,0000336	5720	5,88	1,02
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	0,0529326	0,0530528	0,0001203	5800	20,74	0,0564355	0,0565617	0,0001262	5760	21,91	0,95
		08/10/2014	0,0530528	0,0531615	0,0001087	5930	18,33	0,0565617	0,0566263	0,0000646	5880	10,99	1,67
		15/10/2014	0,0556520	0,0557685	0,0001165	5800	20,09	0,0547235	0,0548303	0,0001068	5790	18,45	1,09
		29/10/2014	0,0557685	0,0558312	0,0000627	5640	11,11	0,0548303	0,0548643	0,0000340	5640	6,03	1,84
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	0,0555141	0,0556258	0,0001118	4480	24,94	0,0542397	0,0543401	0,0001004	4460	22,51	1,11
		18/11/2014	0,0556258	0,0557150	0,0000892	5240	17,02	0,0543401	0,0543982	0,0000581	5260	11,04	1,54
		25/11/2014	0,0584725	0,0585163	0,0000438	5090	8,61	0,0559827	0,0560078	0,0000251	5100	4,92	1,75
		02/12/2014	0,0585163	0,0585467	0,0000304	4940	6,15	0,0560078	0,0560364	0,0000286	4940	5,79	1,06

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela A2 - Dados para obtenção das concentrações de MP₁₀

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Dados internos					Dados externos					Índice I/E
			m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	0,0562333	0,0563806	0,0001473	4097	35,95	0,0550743	0,0551537	0,0000794	3800	20,90	1,72
		06/10/2014	0,0563806	0,0565279	0,0001474	5010	29,41	0,0551537	0,0552664	0,0001127	4930	22,86	1,29
		13/10/2014	0,0552906	0,0554662	0,0001756	4900	35,84	0,0536499	0,0538844	0,0002345	4860	48,25	0,74
		27/10/2014	0,0554662	0,0555113	0,0000451	4900	9,21	0,0538844	0,0539373	0,0000529	4870	10,87	0,85
	Sala D - DEQ	13/11/2014	0,0550262	0,0551613	0,0001351	5510	24,51	0,0547154	0,0547948	0,0000793	5570	14,24	1,72
		20/11/2014	0,0551613	0,0552163	0,0000550	5120	10,74	0,0547948	0,0548990	0,0001042	5160	20,19	0,53
		27/11/2014	0,0585950	0,0586532	0,0000581	5000	11,63	0,0557040	0,0557481	0,0000441	4860	9,06	1,28
		04/12/2014	0,0586532	0,0587025	0,0000493	5680	8,68	0,0557481	0,0558378	0,0000897	5720	15,69	0,55
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	0,0549385	0,0551410	0,0002025	5800	34,92	0,0557441	0,0559102	0,0001661	5760	28,84	1,21
		08/10/2014	0,0551410	0,0553826	0,0002416	5930	40,74	0,0559102	0,0560846	0,0001744	5880	29,67	1,37
		15/10/2014	0,0551068	0,0552524	0,0001456	5800	25,10	0,0541917	0,0543559	0,0001642	5790	28,36	0,88
		29/10/2014	0,0552524	0,0553481	0,0000957	5640	16,97	0,0543559	0,0544088	0,0000530	5640	9,39	1,81
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	0,0539596	0,0541613	0,0002017	4480	45,03	0,0540563	0,0542537	0,0001974	4460	44,27	1,02
		18/11/2014	0,0541613	0,0543645	0,0002032	5240	38,77	0,0542537	0,0544410	0,0001872	5260	35,60	1,09
		25/11/2014	0,0557077	0,0557831	0,0000754	5090	14,82	0,0585007	0,0585740	0,0000733	5100	14,38	1,03
		02/12/2014	0,0557831	0,0558772	0,0000941	4940	19,06	0,0585740	0,0586394	0,0000654	4940	13,24	1,44

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela A3 - Dados para obtenção das concentrações de MPT

Tipo de ventilação	Ambiente	Data	Dados internos					Dados externos					Índice I/E
			m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	m _i (g)	m _r (g)	Δm (g)	Volume de ar (L)	Concentração (μg m ⁻³)	
Ar-condicionado	Sala 3 - DQ	29/09/2014	0,0555256	0,0556940	0,0001685	4100	41,09	0,0560765	0,0562273	0,0001508	3800	39,68	1,04
		06/10/2014	0,0556940	0,0558578	0,0001638	5010	32,69	0,0562273	0,0563516	0,0001243	4930	25,21	1,30
		13/10/2014	0,0541074	0,0543082	0,0002008	4900	40,98	0,0570313	0,0572910	0,0002596	4860	53,43	0,77
		27/10/2014	0,0543082	0,0543958	0,0000876	4900	17,87	0,0572910	0,0573818	0,0000909	4870	18,66	0,96
	Sala D - DEQ	13/11/2014	0,0539619	0,0541113	0,0001494	5510	27,12	0,0529836	0,0530983	0,0001147	5570	20,60	1,32
		20/11/2014	0,0541113	0,0542220	0,0001107	5120	21,62	0,0530983	0,0533738	0,0002755	5160	53,39	0,41
		27/11/2014	0,0559458	0,0560141	0,0000683	4990	13,68	0,0580411	0,0581120	0,0000709	4860	14,59	0,94
		04/12/2014	0,0560141	0,0560817	0,0000676	5680	11,90	0,0581120	0,0582149	0,0001029	5720	17,99	0,66
Natural	Sala 102 - AT5	01/10/2014	0,0538451	0,0541667	0,0003216	5800	55,45	0,0511700	0,0513565	0,0001865	5760	32,38	1,71
		08/10/2014	0,0541667	0,0544455	0,0002789	5930	47,03	0,0513565	0,0517445	0,0003880	5880	65,98	0,71
		15/10/2014	0,0558005	0,0559657	0,0001653	5800	28,49	0,0531840	0,0533630	0,0001790	5790	30,92	0,92
		29/10/2014	0,0559657	0,0560784	0,0001127	5640	19,98	0,0533630	0,0534736	0,0001106	5640	19,62	1,02
	Sala 76 - AT4	11/11/2014	0,0552943	0,0555515	0,0002572	4480	57,41	0,0552246	0,0554364	0,0002118	4460	47,49	1,21
		18/11/2014	0,0555515	0,0557935	0,0002420	5240	46,18	0,0554364	0,0556450	0,0002086	5260	39,66	1,16
		25/11/2014	0,0555818	0,0557261	0,0001443	5090	28,36	0,0553359	0,0554458	0,0001100	5100	21,57	1,31
		02/12/2014	0,0557261	0,0558352	0,0001091	4940	22,08	0,0554458	0,0555526	0,0001068	4940	21,61	1,02

Fonte: Elaborada pela autora.

APÊNDICE B - Concentrações elementares obtidas por ICP-MS e ICP-OES

Tabela B1 - Concentrações em $\mu\text{g m}^{-3}$ para os elementos identificados no $\text{MP}_{2,5}$

Datas	Tipo de ventilação	Local	Ambiente	$\text{MP}_{2,5}$	Na	Mg	Al	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Au	Pb
29/09/14 e 06/10/14	Ar-cond.	Sala 3 - DQ	Interno	18,58	0,21	0,035	0,16	0,34	0,45	0,086	0,0032	0,00050	0,0034	0,15	0,0016	0,0029	0,058	0,00028	0,00094	0,0016	0,000045	0,00033	0,00012	0,00093	0,00013	0,010	0,000092	0,00034	n.d.	0,0013	0,0016
			Externo	14,01	0,21	0,037	0,12	n.d.	0,26	0,30	0,0047	0,00052	0,0036	0,16	0,0006	0,0010	0,015	0,00044	0,00066	n.d.	0,000069	n.d.	0,00011	0,0012	0,00011	0,015	0,00014	0,00042	0,000038	0,0016	0,0014
01/10/14 e 08/10/14	Vent. nat.	Sala 102 - AT5	Interno	19,52	0,091	0,028	0,13	0,53	0,31	0,23	0,0027	0,00047	0,0038	0,14	0,0011	0,0027	0,018	0,00014	0,00079	0,00094	0,000042	0,00022	0,00009	0,00058	0,00021	0,0075	0,000077	0,00027	0,000018	0,0010	0,0021
			Externo	16,39	0,064	0,018	0,13	n.d.	0,19	0,061	0,0026	0,00031	0,0030	0,14	0,0027	0,0018	0,0051	0,00015	0,00050	n.d.	0,000035	0,00016	0,000044	0,00032	0,00011	0,0071	0,000065	0,00029	0,000015	0,0011	0,0012
11/11/14 e 18/11/14	Vent. nat.	Sala 76 - AT4	Interno	20,67	0,17	0,036	0,15	0,77	0,23	0,24	0,0048	0,00081	0,0059	0,18	0,0010	0,0022	n.d.	0,00023	0,00049	0,0013	0,000056	0,00022	0,00025	0,00084	0,00052	0,0083	0,00022	0,00043	0,000024	0,0012	0,0026
			Externo	12,29	0,083	0,019	0,11	0,36	0,14	0,15	0,0016	0,00047	0,0029	0,14	0,0022	0,0019	0,0076	0,00012	0,00026	n.d.	0,000036	0,00032	0,00012	0,00039	0,00024	0,0069	0,00025	0,00040	0,000025	0,0013	0,0012
13/11/14 e 20/11/14	Ar-cond.	Sala D - DEQ	Interno	8,02	0,025	0,012	0,094	n.d.	0,11	< bco	n.d.	n.d.	0,0020	0,085	0,00087	0,0014	n.d.	0,00009	0,00017	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,00036	0,00010	0,0057	0,00005	0,00021	n.d.	0,0011	0,00060
			Externo	16,48	0,071	0,021	0,10	0,26	0,21	< bco	0,0041	0,0005	0,0032	0,13	0,00049	0,0015	n.d.	0,00015	0,00040	n.d.	0,0000	0,00017	0,000073	0,00026	0,00016	0,0062	0,00010	0,00035	0,000024	0,0011	0,00093

Fonte: Elaborada pela autora.

Observações: n.d. = não detectado (abaixo do limite de detecção), < bco = concentração na amostra foi inferior à concentração no branco de caixa

Tabela B2 - Concentrações em $\mu\text{g m}^{-3}$ para os elementos identificados no MP_{10}

Datas	Tipo de ventilação	Local	Ambiente	MP_{10}	Na	Mg	Al	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Au	Pb
29/09/14 e 06/10/14	Ar-cond.	Sala 3 - DQ	Interno	36,75	0,35	0,082	0,37	0,34	0,56	0,42	0,0084	0,0011	0,0061	0,35	0,0015	0,0037	0,049	0,00028	0,0011	0,0023	0,00014	0,0011	0,00016	0,0010	0,00016	0,0097	0,00023	0,00090	0,000056	0,0014	0,0020
			Externo	20,86	0,24	0,054	0,25	n.d.	0,16	0,16	0,010	0,00075	0,0062	0,26	0,00093	0,0016	0,0095	0,00019	0,00041	0,0012	0,00012	0,00048	n.d.	0,00056	0,000095	0,0095	0,00021	0,00071	0,000046	0,0014	0,0011
01/10/14 e 08/10/14	Vent. nat.	Sala 102 - AT5	Interno	37,86	0,19	0,11	0,61	1,01	0,38	1,40	0,030	0,0018	0,011	0,52	0,0013	0,0044	0,032	0,00048	0,00084	0,0041	0,00022	0,0012	0,00012	0,00063	0,00027	0,011	0,00031	0,0013	0,000077	0,0010	0,0026
			Externo	29,26	0,16	0,086	0,64	0,36	0,29	0,48	0,021	0,0018	0,012	0,64	0,0013	0,0031	0,011	0,00050	0,00082	0,0021	0,00020	0,0012	0,000056	0,00063	0,00026	0,011	0,00038	0,0015	0,00010	0,0011	0,0022
11/11/14 e 18/11/14	Vent. nat.	Sala 76 - AT4	Interno	41,65	0,35	0,12	0,61	1,67	0,32	1,78	0,019	0,0021	0,012	0,63	0,0019	0,0050	0,010	0,00050	0,00074	0,0045	0,00023	0,0015	0,00031	0,0010	0,00042	0,011	0,00055	0,0018	0,00013	0,0014	0,0029
			Externo	39,58	0,34	0,11	0,71	1,05	0,32	0,88	0,025	0,0029	0,013	0,78	0,00072	0,0053	0,0056	0,00053	0,00066	0,0031	0,00027	0,0015	0,00029	0,00080	0,00042	0,011	0,00056	0,0018	0,00012	0,0012	0,0030
13/11/14 e 20/11/14	Ar-cond.	Sala D - DEQ	Interno	17,88	0,067	0,056	0,23	0,29	0,31	0,26	0,010	0,00057	0,0041	0,25	0,00070	0,0025	n.d.	0,00020	0,00048	0,0013	0,000091	0,00056	0,000074	0,00037	0,00014	0,0069	0,00017	0,00063	0,000055	0,0011	0,0010
			Externo	23,13	0,20	0,068	0,49	0,28	0,27	0,078	0,017	0,0016	0,011	0,55	0,0011	0,0044	n.d.	0,00039	0,00053	0,0014	0,00022	0,00078	0,00012	0,00069	0,00025	0,0081	0,00039	0,0014	0,00010	0,0011	0,0021

Fonte: Elaborada pela autora.

Observações: n.d. = não detectado (abaixo do limite de detecção)

Tabela B3 - Concentrações em $\mu\text{g m}^{-3}$ para os elementos identificados no MPT

Datas	Tipo de ventilação	Local	Ambiente	MPT	Na	Mg	Al	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Au	Pb
29/09/14 e 06/10/14	Ar-cond.	Sala 3 - DQ	Interno	29,88	0,35	0,095	0,41	n.d.	0,44	0,45	0,011	0,0011	0,0072	0,42	0,0019	0,0069	0,045	0,00028	0,00081	0,0024	0,00014	0,0019	0,00011	0,00092	0,00013	0,010	0,00028	0,0010	0,000073	0,0032	0,0028
			Externo	22,35	0,23	0,068	0,31	n.d.	0,20	0,29	0,009	0,0008	0,0079	0,39	0,00051	0,0028	0,014	0,00029	0,00047	0,0015	0,00013	0,00050	n.d.	0,00045	0,000084	0,011	0,00028	0,00089	0,000066	0,0014	0,0011
01/10/14 e 08/10/14	Vent. nat.	Sala 102 - AT5	Interno	51,19	0,27	0,20	1,08	1,58	0,50	3,56	0,039	0,0026	0,016	0,88	0,0046	0,0068	0,063	0,00078	0,0012	0,0081	0,00030	0,0022	0,00014	0,00088	0,00033	0,014	0,00058	0,0024	0,00013	0,0010	0,0032
			Externo	49,35	0,21	0,17	1,05	0,48	0,42	1,77	0,027	0,0035	0,024	1,18	0,0017	0,0053	0,049	0,00092	0,0011	0,0041	0,00034	0,0021	0,00014	0,00074	0,00022	0,016	0,00059	0,0024	0,00016	0,0010	0,0038
11/11/14 e 18/11/14	Vent. nat.	Sala 76 - AT4	Interno	59,59	0,41	0,16	0,89	2,40	0,42	2,65	0,025	0,0028	0,020	0,83	0,0019	0,0069	0,037	0,00092	0,00082	0,0076	0,00031	0,0022	0,00044	0,00095	0,00039	0,015	0,00072	0,0025	0,00017	0,0012	0,0044
			Externo	43,25	0,32	0,14	1,11	1,09	0,30	0,94	0,045	0,0037	0,020	1,26	0,0011	0,0097	n.d.	0,00068	0,00085	0,0043	0,00040	0,0022	0,00023	0,00092	0,00030	0,012	0,00085	0,0029	0,00017	0,0012	0,0034
13/11/14 e 20/11/14	Ar-cond.	Sala D - DEQ	Interno	19,48	0,11	0,055	0,29	0,31	0,31	0,14	0,009	0,0009	0,006	0,32	0,00058	0,0041	n.d.	0,00021	0,00053	0,0012	0,00012	0,00089	0,00012	0,00069	0,00023	0,0072	0,00023	0,00084	0,000058	0,0011	0,0014
			Externo	36,37	0,20	0,12	1,00	0,32	0,33	0,38	0,035	0,0036	0,015	1,19	0,00091	0,0040	0,0043	0,00059	0,00060	0,0025	0,00035	0,0020	0,00013	0,00066	0,00014	0,010	0,00066	0,0025	0,00018	0,0010	0,0032

Fonte: Elaborada pela autora.

Observações: n.d. = não detectado (abaixo do limite de detecção)

APÊNDICE C - Matriz de p-valores referentes aos coeficientes de correlação cruzada entre os elementos identificados por ICP

Tabela C1 - Matriz de p-valores

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Sr	S	Ti	V	Mn	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Y	Zr	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	Pr	Au	Pb	
Al	1,00																											
Ca	3,72.10 ⁻⁰⁵	1,00																										
Fe	2,22.10 ⁻¹⁶	0,002	1,00																									
K	0,015	0,006	0,048	1,00																								
Mg	0,003	0,005	0,006	0,002	1,00																							
Na	0,002	2,99.10 ⁻⁰⁷	0,015	0,061	0,002	1,00																						
Sr	3,50.10 ⁻¹²	1,71.10 ⁻⁰⁸	1,61.10 ⁻⁰⁸	0,001	2,14.10 ⁻⁰⁴	1,87.10 ⁻⁰⁴	1,00																					
S	8,98.10 ⁻⁰⁷	3,26.10 ⁻¹⁴	1,16.10 ⁻⁰⁴	0,001	2,84.10 ⁻⁰⁴	2,90.10 ⁻⁰⁸	5,11.10 ⁻¹¹	1,00																				
Ti	1,39.10 ⁻¹³	2,22.10 ⁻⁰⁴	4,07.10 ⁻¹¹	0,044	0,010	0,004	6,69.10 ⁻⁰⁹	7,46.10 ⁻⁰⁶	1,00																			
V	3,55.10 ⁻¹⁵	9,63.10 ⁻⁰⁴	0,000	0,040	0,003	0,005	1,71.10 ⁻⁰⁸	5,39.10 ⁻⁰⁵	9,02.10 ⁻¹¹	1,00																		
Mn	2,32.10 ⁻¹³	8,95.10 ⁻⁰⁵	5,93.10 ⁻¹³	0,040	0,002	0,002	5,49.10 ⁻¹⁰	4,44.10 ⁻⁰⁶	1,23.10 ⁻⁰⁸	5,10.10 ⁻¹³	1,00																	
Ni	0,089	2,80.10 ⁻⁰⁴	0,319	0,050	0,318	0,030	0,022	0,003	0,158	0,356	0,232	1,00																
Cu	9,38.10 ⁻⁰⁷	6,34.10 ⁻⁰⁴	5,30.10 ⁻⁰⁶	0,004	1,72.10 ⁻⁰⁴	8,44.10 ⁻⁰⁴	6,08.10 ⁻⁰⁷	8,61.10 ⁻⁰⁶	2,83.10 ⁻⁰⁶	7,14.10 ⁻⁰⁶	5,32.10 ⁻⁰⁶	0,089	1,00															
Zn	0,134	0,004	0,345	9,58.10 ⁻⁰⁷	0,022	0,189	0,012	0,005	0,310	0,357	0,184	0,003	0,085	1,00														
Ga	5,41.10 ⁻¹⁰	1,40.10 ⁻⁰⁶	2,15.10 ⁻⁰⁸	0,009	0,001	3,18.10 ⁻⁰⁴	2,27.10 ⁻¹⁰	8,37.10 ⁻⁰⁸	4,23.10 ⁻⁰⁷	6,98.10 ⁻⁰⁹	5,63.10 ⁻¹²	0,097	8,98.10 ⁻⁰⁵	0,038	1,00													
Rb	0,002	0,001	0,010	5,94.10 ⁻¹⁰	0,002	0,043	1,70.10 ⁻⁰⁴	4,20.10 ⁻⁰⁴	0,008	0,010	0,005	0,020	0,002	1,87.10 ⁻⁰⁶	7,38.10 ⁻⁰⁴	1,00												
Y	0,000	4,16.10 ⁻⁰⁴	0,000	0,030	0,001	0,004	5,35.10 ⁻¹⁰	1,21.10 ⁻⁰⁵	1,06.10 ⁻¹²	0,000	2,40.10 ⁻¹³	0,306	1,24.10 ⁻⁰⁶	0,307	4,43.10 ⁻⁰⁹	0,008	1,00											
Zr	1,90.10 ⁻¹¹	4,65.10 ⁻⁰⁵	1,55.10 ⁻⁰⁹	0,001	1,19.10 ⁻⁰⁴	0,002	5,87.10 ⁻¹²	4,40.10 ⁻⁰⁷	3,24.10 ⁻⁰⁸	2,36.10 ⁻⁰⁹	1,19.10 ⁻⁰⁸	0,060	2,89.10 ⁻⁰⁹	0,037	2,38.10 ⁻⁰⁷	7,10.10 ⁻⁰⁴	2,88.10 ⁻¹⁰	1,00										
Cd	0,019	0,004	0,028	0,068	4,28.10 ⁻⁰⁴	1,32.10 ⁻⁰⁷	0,008	6,69.10 ⁻⁰⁴	0,047	0,006	0,006	0,482	0,003	0,538	0,003	0,113	0,011	0,007	1,00									
Sn	0,055	0,029	0,081	7,19.10 ⁻⁰⁴	6,88.10 ⁻⁰⁶	0,023	0,014	0,010	0,098	0,049	0,055	0,368	0,011	0,017	0,008	4,14.10 ⁻⁰⁴	0,043	0,013	0,002	1,00								
Sb	0,058	0,010	0,099	0,454	0,062	2,31.10 ⁻⁰⁵	0,041	0,008	0,060	0,032	0,028	0,313	0,034	0,838	0,037	0,325	0,057	0,075	2,59.10 ⁻⁰⁶	0,055	1,00							
Ba	4,78.10 ⁻⁰⁴	6,34.10 ⁻⁰⁵	0,002	0,007	3,64.10 ⁻⁰⁴	0,012	1,68.10 ⁻⁰⁵	6,14.10 ⁻⁰⁵	0,003	0,001	1,06.10 ⁻⁰⁴	0,120	0,010	0,002	8,78.10 ⁻⁰⁸	1,78.10 ⁻⁰⁴	8,65.10 ⁻⁰⁴	7,84.10 ⁻⁰⁴	0,042	2,47.10 ⁻⁰⁴	0,271	1,00						
La	9,76.10 ⁻¹²	3,45.10 ⁻⁰⁴	3,36.10 ⁻¹²	0,096	4,92.10 ⁻⁰⁴	3,67.10 ⁻⁰⁴	3,13.10 ⁻⁰⁸	8,61.10 ⁻⁰⁶	2,37.10 ⁻⁰⁹	4,17.10 ⁻¹³	3,14.10 ⁻¹¹	0,258	6,70.10 ⁻⁰⁷	0,533	4,72.10 ⁻⁰⁸	0,036	1,56.10 ⁻¹³	4,55.10 ⁻⁰⁹	6,64.10 ⁻⁰⁴	0,031	0,009	0,002	1,00					
Ce	0,000	9,02.10 ⁻⁰⁵	2,22.10 ⁻¹⁶	0,032	0,001	0,001	8,57.10 ⁻¹¹	1,57.10 ⁻⁰⁶	7,62.10 ⁻¹²	1,11.10 ⁻¹⁵	4,60.10 ⁻¹⁴	0,170	3,78.10 ⁻⁰⁷	0,273	8,45.10 ⁻¹⁰	0,008	0,000	5,52.10 ⁻¹¹	0,005	0,040	0,038	7,40.10 ⁻⁰⁴	2,22.10 ⁻¹⁶	1,00				
Pr	1,06.10 ⁻¹³	4,79.10 ⁻⁰⁴	3,77.10 ⁻¹⁵	0,045	0,001	0,002	3,26.10 ⁻⁰⁹	1,63.10 ⁻⁰⁵	1,66.10 ⁻⁰⁹	1,24.10 ⁻¹⁴	1,52.10 ⁻¹²	0,368	3,41.10 ⁻⁰⁶	0,416	4,63.10 ⁻⁰⁹	0,020	0,000	2,76.10 ⁻¹⁰	0,005	0,045	0,058	0,001	4,88.10 ⁻¹⁵	0,000	1,00			
Au	0,525	0,611	0,531	0,340	0,056	0,487	0,936	0,793	0,408	0,464	0,466	0,797	0,367	0,195	0,509	0,692	0,557	0,464	0,896	0,126	0,336	0,617	0,638	0,551	0,679	1,00		
Pb	2,31.10 ⁻⁰⁷	3,44.10 ⁻⁰⁵	1,36.10 ⁻⁰⁶	0,002	1,38.10 ⁻⁰⁴	2,65.10 ⁻⁰⁵	9,28.10 ⁻⁰⁸	7,11.10 ⁻⁰⁷	1,78.10 ⁻⁰⁵	9,54.10 ⁻⁰⁸	3,14.10 ⁻⁰⁸	0,088	2,38.10 ⁻⁰⁶	0,043	5,26.10 ⁻⁰⁸	4,84.10 ⁻⁰⁴	5,40.10 ⁻⁰⁷	3,37.10 ⁻⁰⁸	1,99.10 ⁻⁰⁵	0,002	0,001	2,41.10 ⁻⁰⁴	2,32.10 ⁻⁰⁷	2,14.10 ⁻⁰⁷	4,72.10 ⁻⁰⁷	0,826	1,00	

Fonte: Elaborada pela autora.

Observação: Foram destacados os p-valores > 0,05, pois indicam que não há correlação significativa entre o par de elementos.

ANEXO A - Dados de precipitação pluviométrica do INMET

Tabela 1 - Precipitação pluviométrica, em mm, para a cidade de São Carlos nos meses de monitoramento

Dia	2014			
	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	0,3	0,0	0,0	4,7
2	2,0	0,0	0,0	0,0
3	35,8	0,0	10,0	0,0
4	0,0	0,0	22,0	0,0
5	0,0	0,0	36,6	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	1,2	0,0
8	0,0	0,0	44,8	3,0
9	0,0	0,0	0,0	5,6
10	0,0	0,0	0,0	8,0
11	0,0	0,0	0,0	5,4
12	0,0	0,0	0,0	18,8
13	0,0	0,0	2,2	63,4
14	0,0	0,0	13,8	22,6
15	0,0	0,0	0,0	6,4
16	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	0,0
20	24,8	2,7	0,0	28,4
21	35,5	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,8	13,8
23	0,0	0,0	0,0	36,8
24	0,0	0,0	0,7	31,4
25	5,5	1,2	12,5	0,0
26	3,1	0,8	18,4	0,0
27	7,1	52,0	11,6	0,0
28	1,9	0,0	20,4	0,0
29	0,0	0,0	0,0	5,6
30	0,0	0,0	1,8	0,0
31		0,0		27,6

Observação: Estão destacados em negrito os valores referentes aos dias das coletas de dados.