

**QUALIDADE AMBIENTAL NO INTERIOR DAS SALAS DE AULA NO 1º CICLO:
REVELANDO AS MELHORIAS QUE PRECISAM DE SER FEITAS!**

***CALIDAD AMBIENTAL EN EL INTERIOR DE LAS AULAS DE PRIMARIA:
¡REVELANDO LAS MEJORAS QUE ES NECESARIO REALIZAR!***

***INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY OF PRIMARY SCHOOLS: UNRAVELING
THE IMPROVEMENTS THAT STILL NEED TO BE DONE!***



Neusa Sofia Guerreiro PEDRO¹
e-mail: nspedro@ie.ulisboa.pt



Edson Pinheiro PIMENTEL²
e-mail: edson.pimentel@ufabc.edu.br



João PIEDADE³
e-mail: jmpiedade@ie.ulisboa.pt



Elisabete CRUZ⁴
e-mail: elisabete.cruz@uevora.pt

Como referenciar este artigo:

PEDRO, N. S. G.; PIMENTEL, E. P.; PIEDADE, J.; CRUZ, E.
Qualidade ambiental no interior das salas de aula no 1º ciclo:
revelando as melhorias que precisam de ser feitas! **Nuances:**
Estudos sobre Educação, Presidente Prudente, v. 36, n. 00,
e025008, 2025. e-ISSN: 2236-0441. DOI:
10.32930/nuances.v36i00.11162



| Submetido em: 30/05/2025
| Revisões requeridas em: 04/06/2025
| Aprovado em: 24/06/2025
| Publicado em: 21/08/2025

Editor: Prof. Dr. Rosiane de Fátima Ponce
Editor Adjunto Executivo: Prof. Dr. José Anderson Santos Cruz

¹ Instituto de Educação, Universidade de Lisboa (UIDEF), Lisboa – Portugal. Professora Associada com Agregação na área de pesquisa e ensino em Currículo, Formação de Professores e Tecnologias Educacionais.

² Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André – SP – Brasil. Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, com atuação em pesquisa sobre Informática Aplicada à Educação. Professora Associada IV, Centro de Matemática, Computação e Cognição (CMCC).

³ Instituto de Educação, Universidade de Lisboa (UIDEF), Lisboa – Portugal. Professora Assistente na área de pesquisa e ensino em Currículo, formação de Professores e Tecnologias Educacionais.

⁴ Universidade de Évora, Centro de Investigação em Educação e Psicologia (CIEP), Évora – Portugal. Docente e pesquisadora na área de Ciências da Educação – Didática, Desenvolvimento Curricular e Tecnologias Educacionais. Professora Assistente, Departamento de Pedagogia e Educação.

RESUMO: O estudo foca na análise da Qualidade Ambiental Interna (QAI) de salas de aula do ensino básico, considerando parâmetros como dióxido de carbono, temperatura, umidade e iluminância. Os dados foram coletados em quatro salas de aula de um país do sul da Europa, em maio de 2022. O estudo visa compreender as diferenças na qualidade ambiental interna entre salas de aula e períodos temporais. Foram utilizadas estatísticas para analisar o Indicador de Taxa de Conformidade (ITC) para cada parâmetro, assinalando a adesão destes aos níveis desejáveis de conformidade. Os resultados mostram diferenças significativas entre as salas de aula, particularmente nos parâmetros temperatura e iluminância. A análise dos diferentes períodos temporais revela flutuações críticas nos níveis de dióxido de carbono e na iluminância. Os resultados indicam grande variabilidade nos parâmetros analisados, com uma tendência severa e instável de agravamento, atingindo índices perigosos.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade Ambiental Interna (QAI). Sala de aula. Edifícios escolares. Indicador de Taxa de Conformidade.

RESUMEN: El estudio aborda la Calidad Ambiental Interior (CAI) de las salas de clases de primaria, centrándose en el dióxido de carbono, la temperatura, la humedad y la iluminancia. Se recopilieron datos de cuatro salas de clases de un país del sur de Europa durante mayo de 2022. El estudio tiene como objetivo comprender las diferencias en el CAI entre salas y períodos de tiempo. Se utilizaron análisis estadísticos para analizar el indicador de tasa de cumplimiento (ITC) para cada parámetro, lo que indica el cumplimiento de los niveles deseables. Los resultados muestran diferencias significativas entre las salas de clases, particularmente en temperatura e iluminancia. El análisis de períodos de tiempo revela fluctuaciones críticas en el dióxido de carbono y la iluminancia. Los resultados muestran una gran variabilidad en los distintos indicadores, con una tendencia severa e inestable de empeoramiento de los indicadores, alcanzando índices peligrosos.

PALABRAS CLAVE: Calidad ambiental interior. Salón de clases. Edifícios escolares. Indicador de índice de conformidad.

ABSTRACT: The study addresses the Indoor Environmental Quality (IEQ) of primary school classrooms, with a focus on Carbon dioxide, Temperature, Humidity, and Illuminance. Data was collected from four classrooms in a Southern European country during May 2022. The study aims to understand differences in IEQ among classrooms and time periods. Descriptive statistics, Kruskal-Wallis tests, and pairwise comparisons were used to analyze the Conformity Rate Indicator (CRI) for each parameter, indicating adherence to desirable IEQ levels. Results show that CO₂ levels are generally acceptable, except for one classroom. Temperature conforms in two classrooms, while Humidity is consistently above recommended levels. Significant differences exist among classrooms, particularly in Temperature and Illuminance. Time-period analysis reveals critical fluctuations in CO₂ and Illuminance. Results show great variability in different indicators, with a severe and unstable trend of worsening indicators throughout the day, reaching dangerous rates.

KEYWORDS: Indoor Environmental Quality (IEQ). Classroom environment. School buildings. Conformity Rate Indicator.

Introdução

A QAI dos edifícios tem recebido atenção crescente no contexto das mudanças climáticas globais e da necessidade de construções e práticas sociais mais sustentáveis. A pandemia de covid-19 intensificou as preocupações com a qualidade do ar, reforçando a necessidade de garantir que os espaços internos sejam seguros e saudáveis, especialmente nas escolas (Zhong; Yuan; Fleck, 2019).

De acordo com Zomorodian, Tahsildoost e Hafezi (2016), estudantes do ensino fundamental e médio passam um número significativo de horas nas dependências escolares; alguns estudos indicam que chegam a passar um terço do dia dentro das escolas (Almeida; Ramos; De Freitas, 2016). A literatura aponta que as condições ambientais internas influenciam não apenas o desempenho acadêmico dos alunos, mas também sua saúde e bem-estar (Al Horr *et al.*, 2016; Castilla *et al.*, 2017; Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014; Griffiths; Eftekhari, 2008; Jain *et al.*, 2020; Mohamed *et al.*, 2021; Moldoveanu, 2015; Roskos; Neuman, 2011; Schneider, 2003; Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013). A qualidade do ambiente interno é crucial para a saúde física e mental, o bem-estar, o desempenho cognitivo e a produtividade. Condições precárias, como baixa qualidade do ar, podem aumentar o absenteísmo (Apte; Erdmann, 2002; Cheryan *et al.*, 2014; Zhong; Lalanne; Alavi, 2021). No contexto educacional, esses fatores contribuem para a redução da aprendizagem e do desenvolvimento dos estudantes, assim como para o desempenho pedagógico dos professores (Al Horr *et al.*, 2016; Griffiths; Eftekhari, 2008; Mohamed *et al.*, 2021; Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013).

Diversos estudos identificaram uma relação direta entre os resultados acadêmicos e as características físicas dos edifícios escolares e sua QAI (Castilla *et al.*, 2017; Griffiths; Eftekhari, 2008; Jain *et al.*, 2020; Lewinski, 2015; Roskos; Neuman, 2011). Fatores como iluminação (quantidade de luz), conforto térmico (temperatura e umidade), acústica (ruído) e qualidade do ar interno são elementos essenciais que podem impactar não apenas a saúde e o bem-estar dos alunos (Castilla *et al.*, 2017; Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014; Lewinski, 2015; Schneider, 2003), mas também o desempenho acadêmico e o desenvolvimento cognitivo, frequentemente em função do desconforto, de doenças e do consequente absenteísmo (Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014; JAIN *et al.*, 2020). Além disso, a exposição de crianças e jovens a agentes biológicos presentes no ar — como bactérias, fungos, mofo, vírus, poeira e pólen — pode gerar faltas escolares devido a crises de asma, alergias, bronquite e outras condições respiratórias, afetando diretamente o desempenho acadêmico (Chatzidiakou;

Mumovic; Dockrell, 2014; Jain *et al.*, 2020; Moldoveanu, 2015; Roskos; Neuman, 2011; Wargocki; Wyon, 2013).

Pesquisas indicam que esses fatores ambientais desempenham papel crucial na criação de um contexto adequado para o desenvolvimento educacional, influenciando resultados acadêmicos, saúde e outros aspectos importantes, como comportamento, concentração e satisfação dos estudantes (Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014; Cheryan *et al.*, 2014; Jain *et al.*, 2020; Roskos; Neuman, 2011; Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013).

Segundo Wargocki e Wyon (2013), as condições ambientais em escolas primárias, mesmo em países economicamente desenvolvidos, frequentemente são inadequadas e piores do que as observadas em ambientes profissionais. Esses autores sugerem que, se condições ambientais adequadas fossem estabelecidas nas salas de aula, o desempenho dos alunos poderia melhorar em até 30% (Wargocki; Wyon, 2013, p. 588). Diversos estudos buscaram medir o impacto de elementos como qualidade do ar, temperatura e iluminação nos ambientes de aprendizagem, particularmente em salas de aula. Chatzidiakou, Mumovic e Dockrell (2014) afirmam que baixas taxas de ventilação e, conseqüentemente, altas concentrações de dióxido de carbono no interior podem prejudicar a atenção, a concentração e induzir fadiga nos estudantes. A baixa qualidade do ar interno pode causar diversos problemas de saúde, incluindo dores de cabeça, cansaço, letargia e arritmias cardíacas, bem como dificuldades de atenção, memória e em tarefas que exigem maior esforço cognitivo (Apte; Erdmann, 2002; Griffiths; Eftekhari, 2008; Lewinski, 2015; Portugal, 2013; Wargocki; Wyon, 2013; Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013). Essa situação também afeta a capacidade de ensino do professor e aumenta o absenteísmo (Cheryan *et al.*, 2014). O Regulamento 353-A/2013, emitido pelos Ministérios do Ambiente, Planeamento Territorial e Energia; Saúde; e Solidariedade, Emprego e Segurança Social de Portugal, estabelece um limite máximo de 1.250 ppm para a concentração de dióxido de carbono em novos edifícios, com tolerância de 30% para construções existentes ou sem sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (ACAC) (Portugal, 2013).

O ambiente térmico é determinado pela temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar (Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014). O conforto térmico é influenciado pelas condições hídrico-térmicas do ambiente e pela adaptação individual de cada pessoa, dependendo ainda de fatores como localização geográfica e estrutura arquitetônica do edifício, clima, período do ano, características biológicas e físicas dos indivíduos (sexo, idade etc.) e da atividade realizada (Al Horr *et al.*, 2016; Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014). Alguns estudos (Earthman, 2004; Liu; Yoshino; Mochida, 2011)

indicam que a temperatura é o atributo mais determinante na percepção da qualidade das salas de aula pelos alunos (Yang; Becerik-Gerber; Mino, 2013). Vários autores sugerem que a faixa de temperatura mais adequada para crianças e seu aprendizado situa-se entre 20 °C e 24 °C, sendo ideal entre 20 °C e 22 °C no inverno e entre 22 °C e 24 °C no verão (Chatzidiakou; Mumovic; Dockrell, 2014; Cheryan *et al.*, 2014; Earthman, 2002, 2004; Lewinski, 2015). Earthman (2002) também recomenda 50% de umidade relativa como valor aceitável para salas de aula. Em Portugal, os níveis de conforto térmico nos edifícios devem variar entre 18 °C e 24 °C no inverno e no verão, considerando um valor médio de umidade relativa entre 35% e 70% (DGAE, 2004, p. 9).

Além do conforto térmico, pesquisas recentes destacam a importância da iluminação na criação de ambientes de aprendizagem adequados, estimulantes e mais produtivos (Barkmann; Wessolowski; Schulte-Markwort, 2012; Samani; Samani, 2012). As condições de iluminação influenciam a visibilidade das tarefas, o desempenho visual, o conforto e a percepção de espaços, pessoas e objetos (Boyce, 2014). No contexto português, as normas para edificações escolares (DGAE, 2004; Parque Escolar, 2017) estipulam que, em uma sala de aula comum, os níveis de iluminação no plano de trabalho devem variar entre 300 e 500 lux, sendo o intervalo ideal entre 350 e 400 lux.

Apesar de diversos estudos investigarem o impacto dos indicadores ambientais escolares sobre a aprendizagem e a saúde, o monitoramento da qualidade ambiental em salas de aula tem ocorrido de forma esporádica. Os trabalhos disponíveis concentram-se, em sua maioria, em periódicos voltados ao design e ao ambiente construído (Aguilar *et al.*, 2022; Almeida; Ramos; De Freitas, 2016; Zhong; Yuan; Fleck, 2019; Zomorodian; Tahsildoost; Hafezi, 2016), havendo poucos com foco específico em questões educacionais. Além disso, embora existam normas que estabelecem parâmetros ideais para diversos indicadores de qualidade ambiental, ainda falta um monitoramento regular desses indicadores que sirva de base para ações voltadas à melhoria das condições nas escolas, especialmente nas salas de aula. Nesse sentido, Pulimeno *et al.* (2020) destacam que diretrizes de diversas organizações, incluindo a Cátedra Unesco em Educação para a Saúde e o Desenvolvimento Sustentável, recomendam ações como: (i) informar professores e demais profissionais da escola sobre como a qualidade do ar interno afeta a saúde e o desempenho acadêmico dos estudantes; (ii) incentivar a adoção de protocolos e medidas para monitorar a qualidade do ar interno em todas as escolas; e (iii) garantir que as salas de aula sejam adequadamente ventiladas antes do início das aulas e durante os intervalos.

Com base nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados de uma avaliação comparativa da qualidade ambiental interna de quatro salas de aula do ensino fundamental em Portugal, considerando quatro indicadores: dióxido de carbono, temperatura, umidade e iluminância. Foram analisados tanto os padrões legalmente estabelecidos quanto os apontados pela literatura como ideais para cada indicador.

O estudo buscou responder às seguintes questões:

- I. Existem diferenças na qualidade ambiental interna entre as salas de aula?
- II. Existem diferenças na qualidade ambiental interna das salas de aula em diferentes períodos do dia?

Materiais e metodologia

Esta seção descreve os procedimentos adotados para a coleta de dados. Primeiro, apresentam-se as características dos locais de coleta e as especificações dos equipamentos usados para registrar os parâmetros ambientais. Em seguida, detalha-se a organização dos dados e os métodos aplicados para análise.

O estudo utilizou exclusivamente medições obtidas por sensores ambientais, sem recorrer a questionários de autorrelato. Esse aspecto diferencia a pesquisa de outros trabalhos da área, nos quais o conforto térmico é medido por índices como o *Thermal Sensation Vote* (Aguilar *et al.*, 2022) e o *Predicted Mean Vote* (Brink *et al.*, 2022), considerados menos confiáveis. Para esta investigação, foi criado o indicador *Conformity Rate Indicator* (CRI) com o objetivo de avaliar a qualidade ambiental interna das salas. O CRI é calculado em porcentagem, com base no número de vezes em que a medição de determinado indicador está dentro do intervalo de valores desejáveis em um período específico. Os níveis desejáveis estão apresentados no Quadro 1. Por exemplo, um CRI de 33% para iluminância indica que, em 33% das medições obtidas em certo período, os valores ficaram entre 300 e 500 lux.

Com base nos limites e valores recomendados pela legislação portuguesa e na análise da literatura sobre indicadores ambientais, definiram-se, para este estudo, os níveis ideais de qualidade ambiental interna para salas de aula (Quadro 1), utilizados como referência para as análises.

Quadro 1 – Níveis desejáveis para os indicadores de QAI em salas de aula

Indicadores	Unidade de medida	Níveis desejáveis para ambientes internos	Referências
CO ₂	Ppm	Até 1250 ppm para edifícios novos; até 1625 ppm para edifícios antigos.	(Portugal, 2013)
Temperatura	°C	Entre 18 °C e 24 °C (verão e inverno).	(DGAE, 2004)
Umidade	% HR	Entre 45% e 55%.	(DGAE, 2004; Earthman, 2002)
Iluminância	Lux	Entre 300 e 500 lux (no plano de trabalho).	(DGAE, 2004; Parque Escolar, 2017)

Fonte: elaborado pelos autores.

A pesquisa foi estruturada em duas fases principais: (1) medição das condições ambientais internas nas salas de aula ao longo do dia, incluindo momentos antes e após as aulas; e (2) avaliação da qualidade ambiental interna das salas com base nos dados coletados na fase 1 e nos parâmetros definidos para obtenção do CRI de cada indicador por sala, a fim de analisar a variação ao longo de diferentes períodos. A quantificação dos momentos em que os indicadores apresentaram valores acima ou abaixo dos níveis desejáveis foi realizada para subsidiar o planejamento de ações de curto, médio e longo prazo, voltadas a manter os indicadores dentro dos limites ideais, beneficiando o bem-estar e o desempenho dos envolvidos.

Características das escolas e salas de aula

Os dados analisados neste estudo foram coletados em quatro salas de aula do 3.º ano do ensino fundamental, localizadas em três escolas distintas da região Norte de Portugal, durante o mês de maio de 2022. Esse período corresponde ao final da primavera. O clima de Portugal é classificado como mediterrânico (mediterrânico com verão quente [Csa] no sul e mediterrânico com verão ameno [Csb] no norte, segundo a classificação climática de Köppen–Geiger), o que torna o país um dos mais temperados da Europa. De acordo com dados oficiais, maio de 2022 foi considerado extremamente quente e muito seco (IPMA, 2022). A temperatura média máxima foi de 26 °C e a mínima média de 13,3 °C, tendo sido registrada a máxima absoluta de 32,8 °C no dia 27 de maio.

Tabela 1 – Características das salas de aula

Escola	Sala	Ano de construção	Área da sala	Total de alunos	Taxa média de ocupação (m ² /pessoa*)
A	C1	1948**	~50m ²	18	2,6
B	C2	1930	~50m ²	18	2,6
C	C3	2017	~50m ²	25	1,9
	C4	2017	~50m ²	24	2,0

Fonte: elaborado pelos autores.

Nota: * O número de pessoas considera o total de alunos mais um professor; ** Sala reformada em 2013.

As salas de aula das escolas A e B estão em edifícios antigos, enquanto as salas da escola C ficam em um edifício recente (construído em 2017). Todas possuem uma única porta de entrada/saída e janelas com persianas ou cortinas. Nenhuma dispõe de sistemas AVAC. As duas salas da escola C contam com aquecimento por piso radiante. A iluminação, em todas, é composta por lâmpadas fluorescentes tubulares (T8 ou T12) acionadas manualmente.

Características e preparação dos dados coletados

As unidades de sensores foram programadas para registrar dados em intervalos aproximados de 20 a 30 segundos, resultando em um total de 8,391 milhões de registros. Após a coleta, as informações referentes a dióxido de carbono, temperatura, umidade relativa e iluminância, obtidas no interior e no exterior das salas, passaram por pré-processamento. Primeiro, os dados das quatro salas foram padronizados pela conversão para intervalos de um minuto, calculando-se valores médios, máximos e mínimos. Utilizou-se a linguagem de programação Python para o pré-processamento e o ambiente Google Colab, também com Python, para as etapas seguintes.

Para viabilizar comparações, os dados coletados nos dois pontos de medição interna (frente e fundo) de cada sala foram unificados pela média aritmética simples. Criou-se um novo atributo para identificar o período de aula correspondente a cada registro (hora e minuto). Foram definidos cinco períodos de 45 minutos, codificados de 1 a 5, conforme os intervalos apresentados no Quadro 2. Vale destacar que as escolas públicas (C1 e C2) tinham um horário levemente diferente das privadas (C3 e C4). Dois intervalos foram considerados: um entre os períodos 2 e 3 (recreio da manhã) e outro entre os períodos 3 e 4 (almoço). A organização e

codificação dos dados por períodos permitiram analisar as variações em diferentes momentos das atividades escolares e facilitaram as comparações entre salas nesses períodos. Para garantir a homogeneidade do conjunto de dados, foram incluídos apenas os registros coletados entre 17 e 30 de maio de 2022.

Quadro 2 – Características dos períodos de aula

Períodos de Aula	Turnos de Aula	Horários por Sala de Aula	
		C1 e C2	C3 e C4
1	Manhã	9:15 h – 9:59 h	09:45 h – 10:29 h
2	Manhã	10:00 h – 10:44 h	10:30 h – 11:14 h
3	Almoço	11:15 h – 11:59 h	12:15 h – 12:59 h
4	Tarde	13:30 h – 14:14 h	14:30 h – 15:14 h
5	Tarde	14:15 h – 14:59 h	15:15 h – 15:59 h

Fonte: elaborado pelos autores.

Para subsidiar a análise, foram gerados dois tipos distintos de conjuntos de dados. O primeiro corresponde aos dados brutos, coletados minuto a minuto.

O segundo foi obtido a partir do processamento do conjunto de dados do Tipo 1, convertendo cada medição interna para o respectivo nível de conformidade descrito no Quadro 3, a saber: (4) nível ótimo, (3) níveis recomendados, (2) fora dos níveis recomendados e (1) níveis perigosos. Após essa conversão, contabilizou-se, para cada período, a ocorrência dos níveis 4 e 3, considerados aceitáveis.

Quadro 3 – Faixas de referência para análise dos dados coletados

Dióxido de Carbono (ppm)		Temperatura (°C ±1) (verão)		Umidade (%)		Iluminância (lux)	
Gama	Nível	Gama	Nível	Gama	Nível	Gama	Nível
<984	4	<22	3	<35	1	<200	1
>=984, <=1500	4	>=22, <=24	4	>=35, <45	2	>=200, <300	2
>1500, <=1625	3	>24, <25	3	>=45, <=49,499	3	>=300, <400	4
>1625, <=2000	2	>=25	1	>49,4999, <50,5	4	>=400, =500	4

>2000	1			>=50,5, <=55	3	>500, <1000	2
				>55;<=70	2	>=1000	1
				>70	1		

Fonte: elaborado pelos autores.

Os atributos do conjunto de dados do Tipo 2, expressos na unidade CRI, estão apresentados no Quadro 4. Esse conjunto contém 200 registros, distribuídos igualmente entre as quatro salas de aula (50 registros por sala).

Quadro 4 – Características dos dados na unidade CRI (Tipo 3)

Atributo	Descrição	Unidade de Medida
Dia	Dia de coleta (1 a 10)	Valores de 1 a 10
Sala	Identificação da sala de aula	Rótulo (texto)
Período	Períodos de aula (1 a 5)	Valores de 1 a 5
indexCO2	CO ₂ : percentual de ocorrências nos níveis 3 ou 4	Percentual
indexTemp	Temperatura: percentual de ocorrências nos níveis 3 ou 4	Percentual
indexHumid	Umidade: percentual de ocorrências nos níveis 3 ou 4	Percentual
indexLumin	Iluminância: percentual de ocorrências nos níveis 3 ou 4	Percentual

Fonte: elaborado pelos autores.

Este artigo concentra a análise no conjunto de dados do Tipo 3. O outro conjunto foi utilizado como apoio, seja por meio de estatísticas ou de representações gráficas. Para selecionar com precisão os dados e definir os testes estatísticos aplicáveis, verificou-se inicialmente a normalidade do conjunto do Tipo 3 (agregado por sala de aula). As análises estatísticas foram realizadas no software IBM SPSS, versão 27 (SPSS Corporation, Chicago, IL, EUA).

Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados obtidos após o processamento dos dados descritos. Embora o foco principal seja o conjunto de dados do Tipo 3, considera-se necessário apresentar, primeiro, as estatísticas descritivas e os gráficos comparativos das medições de cada indicador, para oferecer melhor compreensão das análises posteriores baseadas no CRI.

Medições ambientais por sala de aula

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas (mediana, média, desvio padrão, valores mínimo e máximo), contemplando as médias de cada indicador por sala de aula e por período. Os resultados obtidos indicam o seguinte:

- Dióxido de carbono: os valores de mediana e média tendem a situar-se dentro dos valores de referência recomendados (≤ 1625 ppm) em todas as quatro salas de aula;
- Temperatura: os valores de mediana e média tendem a situar-se dentro dos valores de referência recomendados (≥ 18 e ≤ 25 °C) nas salas C1 e C2, mas não nas salas C3 e C4;
- Umidade: os valores de mediana e média estão acima dos valores de referência recomendados (≥ 45 e ≤ 55 %UR) em todas as quatro salas de aula;
- Iluminância: apenas na sala C3 os valores de mediana e média permaneceram dentro dos valores de referência recomendados (≥ 300 e ≤ 500 lux).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas do conjunto de dados Tipo 2 (médias por sala de aula)

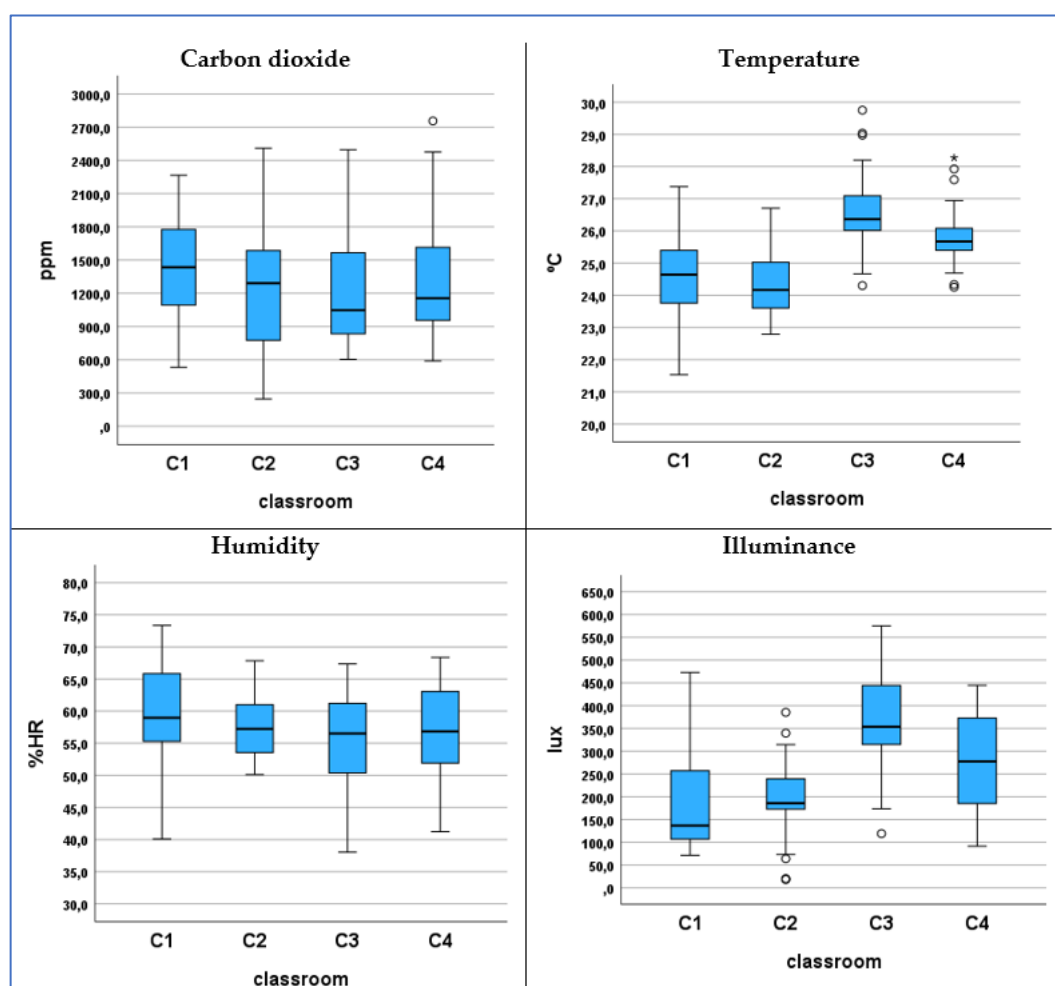
Sala de Aula	Estatísticas Descritivas	Dióxido de Carbono	Temperatura	Umidade	Iluminância
C1	Mediana	1435,627	24,641	58,963	136,722
	Média	1437,327	24,661	59,942	194,094
	Desvio padrão	411,497	1,150	7,277	118,202
	Mínimo	531,606	21,529	40,092	71,500
	Máximo	2266,776	27,373	73,343	472,633
C2	Mediana	1291,799	24,166	57,246	185,678
	Média	1194,695	24,314	57,811	192,200

	Desvio padrão	552,596	,952	4,939	72,231
	Mínimo	245,468	22,789	50,111	18,067
	Máximo	2510,838	26,704	67,829	385,133
	Mediana	1047,776	26,362	56,522	353,589
	Média	1245,535	26,561	55,436	374,111
C3	Desvio padrão	513,273	1,032	7,107	106,732
	Mínimo	603,199	24,300	38,038	118,911
	Máximo	2496,915	29,750	67,350	575,089
	Mediana	1156,727	25,668	56,840	277,500
	Média	1325,348	25,780	57,101	276,984
C4	Desvio padrão	507,885	,784	6,875	99,721
	Mínimo	588,793	24,249	41,237	91,378
	Máximo	2756,866	28,271	68,386	444,700

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta diagramas de caixa (*boxplots*) com a distribuição dos dados por sala de aula, permitindo uma avaliação visual das diferenças e semelhanças para cada indicador. Por exemplo, no gráfico de Temperatura, observa-se que as salas C1 e C2 diferem das salas C3 e C4, com base na distância entre os limites das caixas. Situação semelhante ocorre no gráfico de Iluminância, em que as caixas referentes às salas C1 e C2 apresentam distanciamento em relação à sala C3. A significância estatística dessas diferenças é verificada posteriormente por meio de testes estatísticos.

Figura 1 – Diagramas de caixa (*boxplots*) da distribuição das medições por sala de aula



Fonte: elaborado pelos autores.

Características da distribuição do conjunto de dados de taxas de conformidade

O teste de Kolmogorov-Smirnov, aplicado ao conjunto de dados do Tipo 3, indicou que a distribuição dos dados para cada sala de aula não apresentou normalidade nos quatro atributos avaliados ($p < 0,001$ para $\alpha = 0,05$). O teste de Shapiro-Wilk apresentou resultados semelhantes, embora seja mais sensível, especialmente para amostras de tamanho reduzido (Tabela 3).

Tabela 3 – Teste de normalidade para o conjunto de dados Tipo 3 por sala de aula

Indicadores	Sala de Aula	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		Estatística	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
Dióxido de carbono	C1	,310	50	<,001	,755	50	<,001
	C2	,318	50	<,001	,720	50	<,001
	C3	,342	50	<,001	,665	50	<,001
	C4	,360	50	<,001	,654	50	<,001
Temperatura	C1	,323	50	<,001	,684	50	<,001
	C2	,416	50	<,001	,598	50	<,001
	C3	,498	50	<,001	,267	50	<,001
	C4	,359	50	<,001	,527	50	<,001
Umidade	C1	,427	50	<,001	,580	50	<,001
	C2	,354	50	<,001	,669	50	<,001
	C3	,372	50	<,001	,670	50	<,001
	C4	,367	50	<,001	,658	50	<,001
Iluminância	C1	,398	50	<,001	,548	50	<,001
	C2	,486	50	<,001	,431	50	<,001
	C3	,148	50	,008	,899	50	<,001
	C4	,216	50	<,001	,786	50	<,001

Fonte: elaborado pelos autores.

O teste de homogeneidade de variâncias (Levene) também foi aplicado ao conjunto de dados do Tipo 3. As variâncias entre as salas mostraram-se homogêneas para Dióxido de Carbono e Umidade quando analisadas pela mediana, já que os valores de significância foram superiores a 0,05 ($p = 0,319$ e $p = 0,178$, respectivamente). No entanto, considerando as médias, não houve homogeneidade ($p = 0,03$ e $p < 0,001$, respectivamente). Para Temperatura e Iluminância, as variâncias entre os grupos não se mostraram homogêneas (Tabela 4).

Tabela 4 – Teste de homogeneidade de variância (teste de Levene)

		Teste de Levene	df1	df2	Sig.
Dióxido de carbono	Com base na média	3,048	3	196	,030
	Com base na mediana	1,178	3	196	,319
Temperatura	Com base na média	46,502	3	196	<,001
	Com base na mediana	10,367	3	196	<,001
Umidade	Com base na média	8,001	3	196	<,001
	Com base na mediana	1,658	3	196	,178
Iluminância	Com base na média	18,330	3	196	<,001
	Com base na mediana	16,154	3	196	<,001

Fonte: elaborado pelos autores.

Considerando os resultados dos testes de normalidade e de homogeneidade de variância, optou-se pela aplicação de testes não paramétricos.

Estatísticas descritivas do CRI e análise comparativa por sala de aula

A Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas (mediana, média e desvio padrão) do conjunto de dados Tipo 2, com ênfase na mediana, uma vez que serão utilizados testes estatísticos não paramétricos. Os valores estão expressos em porcentagem, permitindo observar o seguinte:

- Dióxido de carbono: as taxas estiveram predominantemente em conformidade com os valores desejáveis nas quatro salas, sendo a mediana mais baixa observada em C1 (98%);

- Temperatura: as taxas estiveram em conformidade principalmente em C1 e C2 (medianas de 99% e 100%, respectivamente), mas não em C3 e C4 (mediana = 0,00);
- Umidade: as taxas apresentaram predominância de não conformidade (mediana = 0,00) nas quatro salas;
- Iluminância: as taxas estiveram moderadamente em conformidade em C3 e C4 (medianas de 62% e 53%, respectivamente), enquanto em C1 e C2 os valores foram inaceitáveis (mediana = 0,00).

Tabela 5 – Estatísticas descritivas do CRI

Indicadores	Estatísticas Descritivas	C1	C2	C3	C4
CO2	Mediana	97,778	100,000	100,000	100,000
	Média	64,356	76,844	75,778	75,289
	Desvio padrão	41,448	33,114	37,223	38,429
Temperatura	Mediana	98,889	100,000	,000	,000
	Média	58,489	73,289	4,889	12,311
	Desvio padrão	47,367	42,798	19,636	26,432
Umidade	Mediana	,000	,000	,000	,000
	Média	19,556	33,556	37,778	31,289
	Desvio padrão	35,863	44,606	46,510	43,694
Iluminância	Mediana	,000	,000	62,222	53,333
	Média	19,067	8,089	58,889	51,378
	Desvio padrão	36,708	21,577	34,506	43,698

Fonte: elaborado pelos autores.

De maneira geral, todas as salas apresentaram níveis aceitáveis de dióxido de carbono, sem risco significativo para a qualidade do ambiente de aprendizagem. No entanto, observa-se que a mediana em C1 é ligeiramente inferior às demais salas, sugerindo possível diferença na ventilação do ar. Quanto à temperatura, apenas C1 e C2 apresentaram taxas dentro dos níveis de conformidade, enquanto C3 e C4 não atingiram os padrões desejados. Em relação à umidade, os níveis registrados em todas as salas permaneceram persistentemente abaixo dos padrões recomendados. Já quanto à iluminância, os resultados de C1 e C2 foram críticos, enquanto C3

e C4 apresentaram valores moderadamente alinhados com os padrões desejáveis. Observa-se ainda que todos os parâmetros ambientais analisados apresentaram altos desvios padrão, indicando considerável dispersão nos valores registrados.

Para analisar as diferenças do CRI entre salas, aplicou-se o teste de Kruskal–Wallis. Os resultados não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre as salas para dióxido de carbono [$X^2(3) = 3,828$; $p = 0,281$] e umidade [$X^2(3) = 3,662$; $p = 0,300$]. Entretanto, houve diferenças significativas entre salas quanto à temperatura [$X^2(3) = 77,730$; $p < 0,001$] e iluminância [$X^2(3) = 69,354$; $p < 0,001$]. Em seguida, realizou-se o teste de comparação pareada com correção de Bonferroni para cada indicador. Os resultados demonstraram que, para temperatura e iluminância, as diferenças ocorreram entre as salas das escolas privadas (C3 e C4) e das escolas públicas (C1 e C2), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação pareada por sala de aula – Temperatura e Iluminância

Temperatura					
Amostra 1- Amostra 2	Teste Estatísticas	Teste padrão Estatísticas	Teste Estatísticas	Sig.	Adj. Sig. ^a
C3-C4	-16,330	10,508	-1,554	,120	,721
C3-C1	62,000	10,508	5,900	,000	,000
C3-C2	80,590	10,508	7,669	,000	,000
C4-C1	45,670	10,508	4,346	,000	,000
C4-C2	64,260	10,508	6,115	,000	,000
C1-C2	-18,590	10,508	-1,769	,077	,461
Iluminância					
Amostra 1- Amostra 2	Teste Estatísticas	Teste padrão Estatísticas	Teste Estatísticas	Sig.	Adj. Sig. ^a
C2-C1	16,730	10,933	1,530	,126	,756
C2-C4	-61,890	10,933	-5,661	,000	,000
C2-C3	-79,060	10,933	-7,231	,000	,000
C1-C4	-45,160	10,933	-4,131	,000	,000
C1-C3	-62,330	10,933	-5,701	,000	,000
C4-C3	17,170	10,933	1,570	,116	,698

Fonte: elaborado pelos autores.

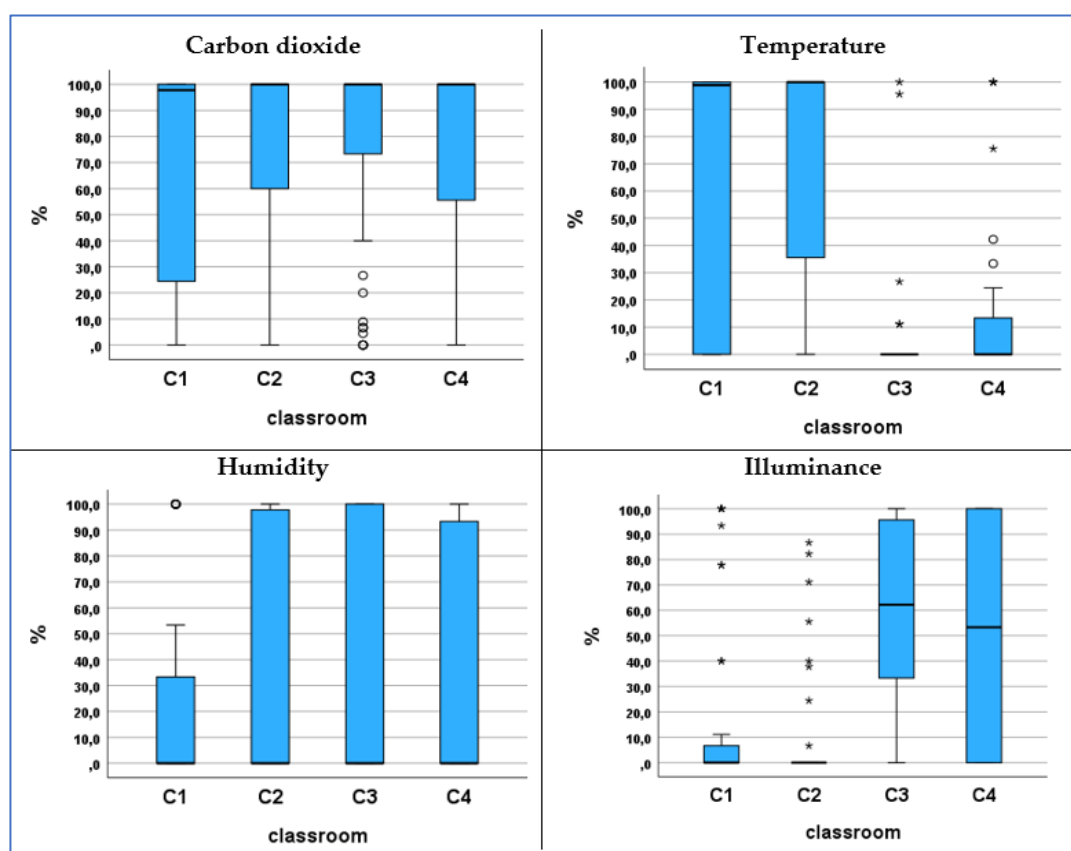
Cada linha testa a hipótese nula (H_0) de que as distribuições da Amostra 1 e da Amostra 2 são iguais. São apresentadas as significâncias assintóticas (teste bilateral). O nível de significância adotado é 0,050. Os valores de significância foram ajustados utilizando a correção de Bonferroni para múltiplos testes.

Os resultados dos testes de Kruskal–Wallis e das comparações pareadas podem ser visualizados na Figura 2, que apresenta os gráficos de *boxplot* da distribuição do CRI por sala de aula para dióxido de carbono, temperatura, umidade e iluminância. Os gráficos à direita (temperatura e iluminância) evidenciam claramente as diferenças entre C1–C2 e C3–C4. Por exemplo, no gráfico de temperatura, C3 e C4 apresentam uma distribuição significativamente distinta de C1 e C2. O mesmo ocorre no gráfico de iluminância, porém na direção oposta à tendência observada para a temperatura.

Comparação do CRI por período de aula

Os gráficos da Figura 2 mostram as variações de dióxido de carbono, temperatura, umidade e iluminância ao longo do período considerado para esta análise (10 dias) nas quatro salas de aula, agora categorizadas por períodos de aula (eixo X).

Figura 2 – Gráficos de *boxplot* da distribuição de níveis de taxa aceitável por sala de aula



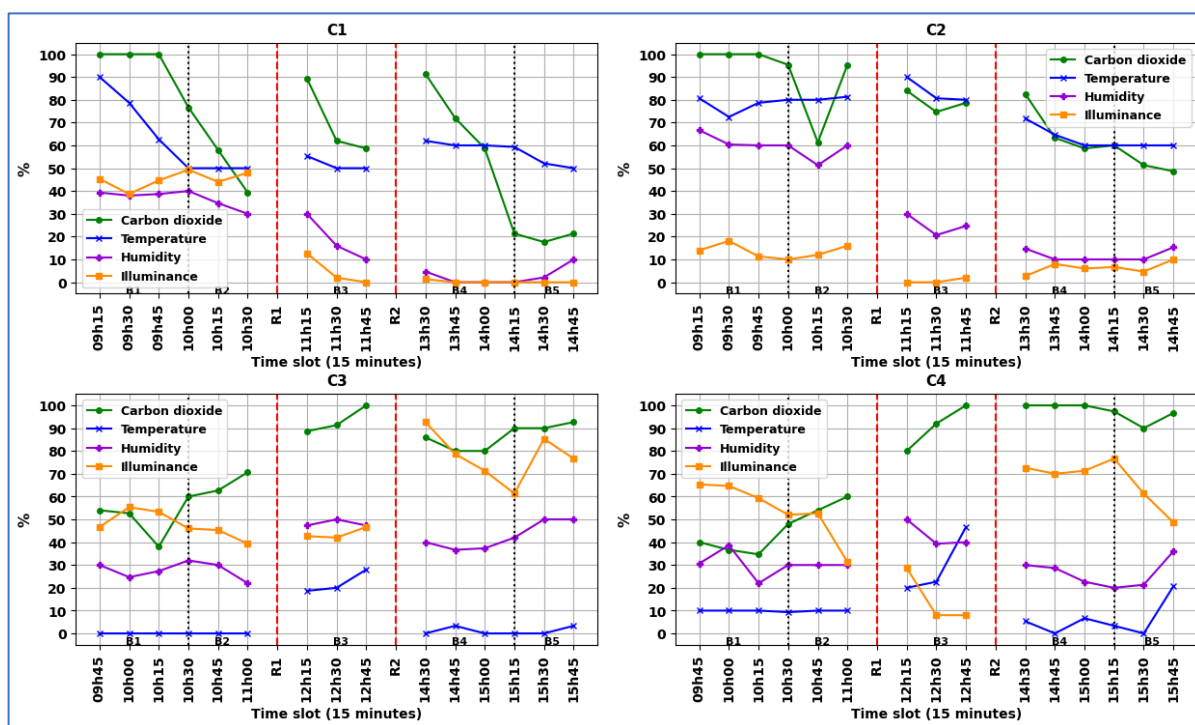
Fonte: elaborado pelos autores.

As linhas verticais tracejadas em vermelho destacam dois intervalos: R1 – recreio do meio da manhã; R2 – segundo recreio ou intervalo para almoço, períodos em que os alunos estão fora das salas. As linhas verticais tracejadas em preto delimitam os períodos B1/B2 e B4/B5. Analisando a Figura 3, podem-se destacar as seguintes observações sobre os CRIs detectados para cada indicador:

- Dióxido de carbono (linha verde): na sala de aula C1, a taxa inicia em 100% no período B1 e cai para 40% ao final do período 2, indicando que os níveis de dióxido de carbono se deterioram significativamente ao longo do dia. Após R1, no início do período 3, a taxa inicia em 90% e reduz para 60% após 45 minutos. Também, após R2, no início do período 4, a taxa começa em 90% e diminui para 20% ao final do período 5. O comportamento desse parâmetro em C2 é semelhante. Nas salas C3 e C4, que pertencem à mesma escola, as taxas de dióxido de carbono apresentam comportamento diferente em relação a C1 e C2. Elas iniciam entre 40% e 50% (período B1) e melhoram até o

final do período 2. Tanto em C3 quanto em C4, a taxa melhora após o período 3 e continua aumentando à tarde, durante os períodos 4 e 5. Esse comportamento é considerado associado à abertura das portas e janelas das salas de aula;

Figura 3 – CRI por período de aula (média por sala ao longo dos 10 dias analisados)



Fonte: elaborado pelos autores.

- Temperatura (linha azul): na sala C1, a taxa inicia em 90% no período 1 e cai para 40% ao final do período 2, indicando que os níveis de temperatura se afastam dos valores aceitáveis. No período 3, as taxas permanecem em torno de 50%, e no início do período 4 aproximam-se de 60%, caindo ligeiramente ao final do período 5. Na sala C2, as taxas começam em 80% no período 1 e permanecem relativamente estáveis até o final do período 3. À tarde, o período 4 inicia com taxa de 70% e cai para 60%. Nas salas C3 e C4, as taxas de níveis aceitáveis de temperatura começam com valores baixos, entre 0 e 10%, apresentando melhora ao longo do dia, devido à orientação do edifício voltada para o sul;
- Iluminância (linha laranja): na sala C1, a taxa mantém-se em torno de 45% nos períodos 1 e 2, e cai para níveis próximos de zero a partir do período 3. O comportamento é semelhante em C2, porém com valores abaixo de 20% a partir do período B1. Em C3 e

C4, os valores permanecem acima de 50% até a metade do período 2. Em C4, a taxa cai abaixo de 30% no período B3. Em ambas as salas, as taxas sobem acima de 60% no período 4 e começam a cair novamente ao final do período 5.

As diferenças entre os CRIs em relação aos períodos também foram examinadas por meio do teste de Kruskal–Wallis. Considerando o conjunto completo de dados, sem separação por sala, os resultados não indicaram diferenças significativas entre os períodos para todos os indicadores ($p > 0.05$): (i) Dióxido de carbono [$X^2(4) = 8,084$; $p = 0,089$]; (ii) Temperatura [$X^2(4) = 3,271$; $p = 0,514$]; (iii) Umidade [$X^2(4) = 6,925$; $p = 0,140$]; (iv) Iluminância [$X^2(4) = 6,764$; $p = 0,149$]. Considerando a divisão por sala, como mostrado na Tabela 7, foram encontradas diferenças significativas em relação à variável “Período de Aula”, exceto para a Temperatura.

Tabela 7 – Indicadores com diferenças no teste de Kruskal–Wallis em relação ao período de aula

Sala	Indicator	Sig. ^{a,b}
C1	CO2	<0.001
	Iluminância	0.007
C2	Umidade	0.037
C3	CO2	0.006
	Iluminância	0.024
C4	CO2	<0.001
	Iluminância	0.049

Fonte: elaborado pelos autores.

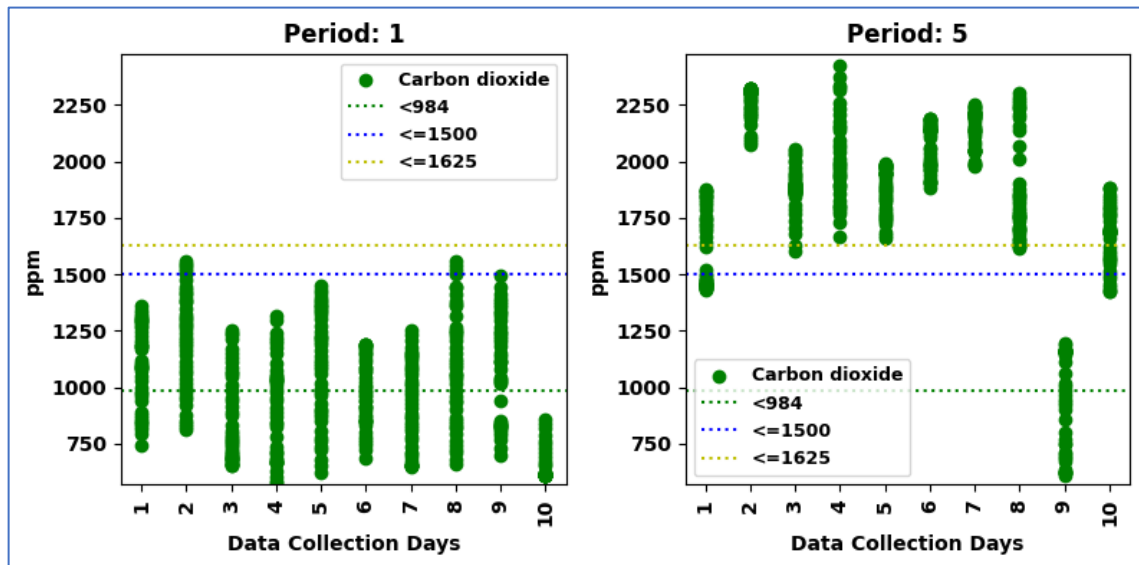
Nota: Variável: a = nível de significância = 0,050; b = significância assintótica apresentada.

Com base nos resultados da Tabela 7, aplicou-se o teste de comparações múltiplas (*pairwise*) com correção de Bonferroni, revelando o seguinte:

- Dióxido de carbono: foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os períodos 1 e 5 na sala C1 (Adj. Sig. < 0,001) e na sala C3 (Adj. Sig. = 0,008). Na sala C4, as diferenças ocorreram entre os períodos 1 e 4 (Adj. Sig. = 0,004), 1 e 5 (Adj. Sig. = 0,016), 2 e 3 (Adj. Sig. = 0,048), 2 e 4 (Adj. Sig. = 0,003) e 2 e 5 (Adj. Sig. = 0,015).

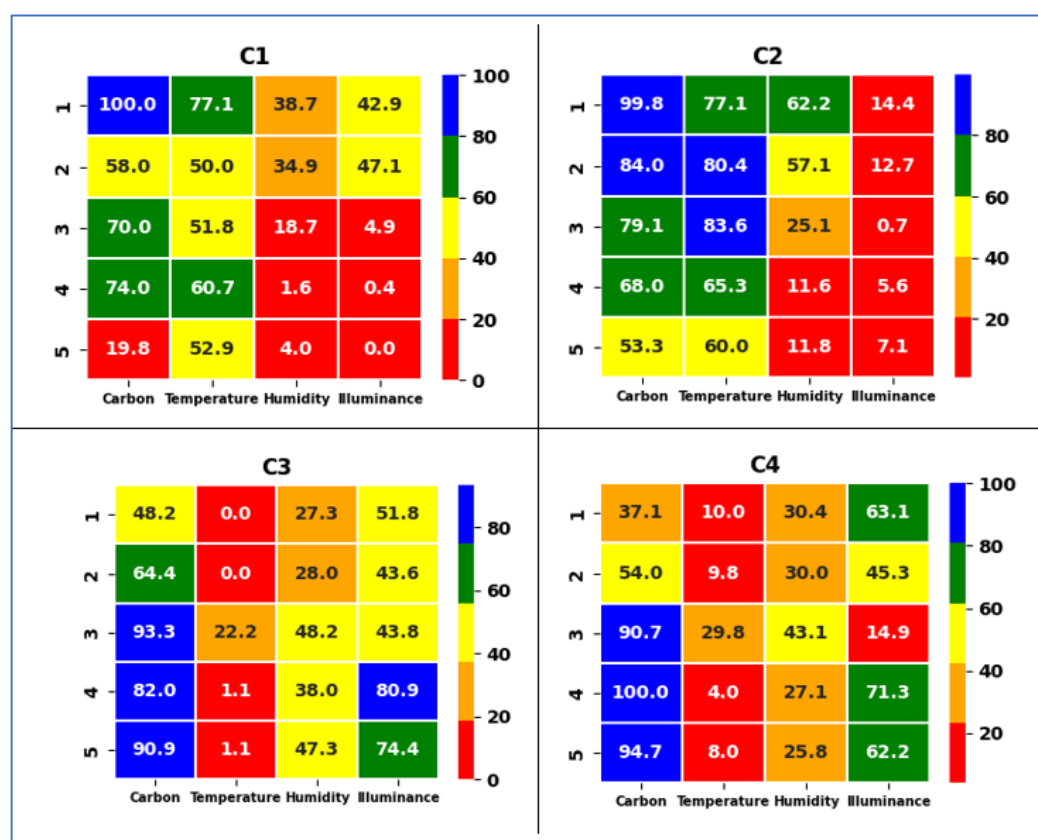
A Figura 4 permite observar as diferenças entre os períodos na sala C1. Nota-se que, no gráfico do período 1, os pontos verdes permanecem predominantemente abaixo de 1.500 ppm durante os 10 dias, enquanto no período 5 (final do dia), esses pontos estão majoritariamente acima de 1.500 ppm, atingindo valores críticos;

Figura 4 – Comparação do dióxido de carbono na sala C1 nos períodos 1 e 5



Fonte: elaborado pelos autores.

- Umidade: as diferenças são estatisticamente significativas apenas na sala C2, entre os períodos 1 e 4 ($p = 0,019$), 2 e 4 ($p = 0,034$), 1 e 5 ($p = 0,020$) e 2 e 5 ($p = 0,036$), ou seja, entre os períodos da manhã e da tarde, indicando uma queda significativa ao longo do dia;
- Iluminância: as diferenças são estatisticamente significativas na sala C1 entre os períodos 1 e 5 (Adj. Sig. = 0,030), evidenciando uma queda considerável, e na sala C4, entre os períodos 3 e 4 (Adj. Sig. = 0,039), indicando uma melhora substancial.

Figura 5 – Mapa de calor dos indicadores por período de aula (por sala)

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 5 apresenta gráficos em formato de mapa de calor para cada uma das quatro salas (C1 a C4), utilizando uma escala de cinco cores que representa o quanto os índices permaneceram dentro dos parâmetros desejáveis durante cada um dos cinco períodos ao longo de dez dias. Considerando os quatro indicadores, observa-se que: (i) a sala C2 apresenta o maior índice favorável ($CRI \geq 60\%$), concentrado principalmente nos indicadores de dióxido de carbono e temperatura; (ii) tanto em C1 quanto em C2, quase todos os indicadores de umidade e iluminação estão abaixo do intervalo desejável ($CRI \geq 60\%$); (iii) as salas C3 e C4 apresentam valores de CRI inferiores a 60% nos indicadores de temperatura e umidade.

Considerações finais

Numerosos estudos indicam que o desempenho acadêmico é influenciado pela QAI dos edifícios escolares, a qual se apresenta positivamente correlacionada com a aprendizagem, o comportamento, a satisfação e o rendimento dos alunos. Considerando que estudantes do ensino

fundamental passam várias horas em sala de aula, torna-se essencial que as escolas monitorem constantemente a qualidade ambiental interna desses espaços, utilizando essas informações para garantir um ambiente de aprendizagem limpo, saudável e produtivo (Brink *et al.*, 2022). Essa abordagem proativa pode contribuir para a melhoria da experiência educacional, reduzir a incidência de problemas de saúde induzidos pelo ambiente e maximizar o potencial de aprendizagem dos alunos, bem como a atividade pedagógica e o bem-estar dos professores.

No entanto pesquisas indicam que a avaliação da qualidade ambiental das salas de aula enfrenta limitações significativas: (i) tende a ocorrer de forma esporádica e episódica; (ii) é predominantemente realizada por pesquisadores de outras áreas científicas, sem foco nas ciências da educação; (iii) raramente coleta parâmetros reais, valendo-se principalmente de questionários de satisfação dos usuários.

Para contornar essas limitações, o presente estudo examinou a qualidade ambiental interna de quatro salas de aula do ensino fundamental, coletando dados sobre dióxido de carbono, temperatura, umidade e iluminância. O objetivo foi verificar até que ponto esses indicadores permaneciam em conformidade com os parâmetros desejáveis estabelecidos. Por meio do cálculo do CRI, buscou-se determinar se existiam diferenças significativas nas taxas de conformidade entre as quatro salas de aula portuguesas e entre os diferentes períodos do dia.

Os resultados demonstraram que, de maneira geral, com base nos valores médios calculados, os níveis de dióxido de carbono tendem a situar-se dentro dos valores de referência recomendados nas quatro salas. A temperatura encontra-se dentro dos valores de referência apenas em duas das quatro salas (C1 e C2). Os níveis de umidade apresentaram-se acima dos valores de referência em todas as salas, enquanto a iluminância apresentou valores dentro dos parâmetros recomendados apenas em uma sala (C3).

Esses resultados indicam que, de forma geral, todas as salas apresentam alguns valores ambientais preocupantes, uma vez que eles podem ter consequências adversas sobre o conforto, o bem-estar e a produtividade de alunos e professores. Torna-se necessária investigação adicional para identificar as causas e implementar medidas corretivas adequadas.

Além disso, os resultados evidenciaram diferenças significativas na qualidade ambiental entre as quatro salas, especificamente nos indicadores de temperatura e iluminância. Esses indicadores apresentaram valores marcadamente distintos entre as salas situadas em escolas públicas, localizadas em edifícios históricos, e as duas salas de uma escola privada, situada em um edifício mais moderno. Os valores de iluminância foram mais favoráveis nas salas da escola privada. Contrariando expectativas, as salas das escolas públicas apresentaram valores térmicos

mais aceitáveis. É importante destacar que, conforme os resultados deste estudo, as diferenças significativas frequentemente observadas internacionalmente entre edifícios e condições de trabalho de escolas privadas e públicas não se verificam no sistema educacional português.

Outro achado relevante refere-se à análise dos valores registrados para os indicadores de qualidade ambiental em diferentes períodos do dia escolar. Os resultados mostram que, quando analisados de forma coletiva, os indicadores tendem a apresentar valores aceitáveis. Entretanto, ao serem analisados separadamente para os cinco períodos considerados, foram detectadas variações críticas.

Na comparação entre os períodos, em cada sala analisada, os resultados indicaram diferenças significativas nas variações das taxas de dióxido de carbono e iluminância em três das quatro salas, e de umidade em uma delas. Alguns períodos apresentaram grande variabilidade entre os indicadores, com tendência severa e instável de piora ao longo do dia, atingindo níveis perigosos em determinados momentos. Resultados similares foram encontrados em outros estudos (Catalina *et al.*, 2022; Tran *et al.*, 2023). As razões para essa elevada variação precisam ser exploradas e mitigadas em estudos futuros.

A principal contribuição deste estudo reside na investigação da variação temporal da QAI em salas de aula, com foco no cálculo do Indicador de Taxa de Conformidade, considerando os valores desejáveis. Diferentemente de estudos baseados em opiniões, que podem ser influenciados por vieses subjetivos, os indicadores ambientais utilizados neste estudo fornecem informações derivadas de medições confiáveis, reduzindo a possibilidade de distorções nas conclusões (Aguilar *et al.*, 2022; Brink *et al.*, 2022). Adicionalmente, o procedimento de análise de dados adotado constitui uma contribuição relevante para pesquisas sobre o tema, considerando que: (i) foram analisadas as taxas de conformidade dos indicadores monitorados em relação aos valores estabelecidos como desejáveis pela legislação e pela literatura pertinente; (ii) a coleta contínua e transversal dos dados ao longo de diversos dias de trabalho foi realizada, superando a simples medição episódica de indicadores ambientais. Essa relação entre medições contínuas e valores de referência permitiu uma análise mais profunda e abrangente da qualidade ambiental interna das salas, impactando potencialmente a efetividade dos processos de aprendizagem e seus resultados.

Por fim, com base nos resultados obtidos, são feitas as seguintes recomendações, voltadas principalmente a professores e conselhos escolares: (i) promover a conscientização da comunidade escolar sobre a importância do monitoramento frequente e contínuo dos indicadores de QAI nas salas de aula; (ii) realizar estudos-piloto envolvendo professores na

coleta de dados (possivelmente iniciando com um único indicador e, posteriormente, expandindo) e envolvendo também os alunos no processamento dos dados, integrando-o como projeto curricular; (iii) discutir os resultados com o corpo docente, considerando ainda os benefícios de estender essa discussão a outros usuários dos espaços internos das escolas, incluindo alunos e demais partes interessadas; (iv) identificar ações práticas para a melhoria dos indicadores; (v) elaborar planos de intervenção nos edifícios para aprimorar a qualidade ambiental das salas de aula e demais espaços de trabalho; (vi) desenvolver projetos de financiamento que viabilizem a aquisição e implementação de sistemas de monitoramento automático e de controle inteligente da qualidade ambiental. Essas recomendações básicas podem contribuir significativamente para a conscientização de todos os atores da educação sobre o desenvolvimento sustentável no interior das escolas e, ao mesmo tempo, incentivar a adoção de medidas relacionadas à eficiência energética e à sustentabilidade dos edifícios escolares (Nakaoka *et al.*, 2022).

Especificamente para as quatro salas de aula monitoradas neste estudo, recomenda-se a instalação de sistemas inteligentes ACAC, a fim de reduzir a amplitude das variações das condições internas. Caso a instalação desses sistemas não seja viável, recomenda-se a realização de monitoramentos periódicos, por exemplo, em diferentes períodos, para orientar a abertura regular de portas e janelas. Para salas com indicadores de iluminação inadequados, recomenda-se fortemente a revisão do sistema de iluminação, garantindo um equilíbrio adequado em toda a área de trabalho para alunos e professores.

No que se refere à melhoria da QAI, algumas intervenções que poderiam ser consideradas incluem: a redução do número de alunos por sala; a isolamento térmica de paredes e janelas para reduzir a transferência indesejada de calor; a instalação de termostatos inteligentes capazes de controlar a temperatura e garantir conforto; a instalação de sistemas de ventilação para renovação adequada do ar; e a instalação de sistemas de iluminação reguláveis em intensidade, adaptando-se às condições do ambiente. Considerando a conservação de energia, também seria relevante estudar: o uso de termostatos com ajuste automático de temperatura baseado nos horários de ocupação; alertas para abertura de janelas ou portas quando os indicadores estiverem insatisfatórios; utilização de sensores e sistemas de controle automatizado para ajustar a ventilação conforme a necessidade real de ocupação, evitando desperdício de energia em áreas não utilizadas; e priorização do uso de luz natural para reduzir a dependência de iluminação artificial durante o dia, especialmente considerando a incidência solar disponível no país.

Como continuidade deste trabalho, que faz parte de um projeto em andamento voltado à melhoria das salas analisadas (Pedro *et al.*, 2023), os planos futuros incluem a realização de novas medições após a implementação de estratégias para aprimorar ventilação, resfriamento e iluminação, garantindo que as crianças aprendam em um ambiente seguro e saudável. Um sistema inteligente será empregado para reagir prontamente sempre que os indicadores estiverem fora dos parâmetros recomendados. Adicionalmente, pretende-se correlacionar os dados sobre os fatores de qualidade ambiental coletados com as percepções de alunos e professores em relação ao conforto ambiental e ao desempenho acadêmico.

Limitações

Embora este estudo tenha alcançado resultados significativos e extraído conclusões essenciais para orientar possíveis ações de melhoria dos ambientes de aprendizagem, é fundamental reconhecer certas limitações no processo de coleta de dados, bem como nas decisões adotadas para seu pré-processamento e análise.

Em primeiro lugar, destaca-se o tamanho limitado da amostra utilizada, o que afeta a representatividade dos resultados. Os dados foram coletados em um número restrito de salas durante um período específico, em escolas com localização, arquitetura e instalações particulares. Esse escopo limitado impede a generalização dos resultados mesmo para outras salas do mesmo país, devido à variabilidade significativa das características dos edifícios do ensino fundamental. Embora o estudo tenha considerado escolas privadas e públicas, não foi adotada uma abordagem comparativa, considerando que, em Portugal, não se observam diferenças relevantes na qualidade dos edifícios escolares entre os dois subsistemas. Outro aspecto crítico refere-se ao fato de que o estudo considerou apenas escolas da região norte de Portugal; portanto, não abordou variações climáticas em diferentes regiões do país. De forma similar, os dados não foram coletados em diferentes períodos do ano, o que limitaria a análise de variações sazonais. Tais elementos devem ser considerados em pesquisas futuras.

Adicionalmente, é importante reconhecer que nem todos os parâmetros de QAI foram considerados. Este estudo não analisou velocidade do ar, temperatura radiante, partículas químicas ou biológicas, ruído, níveis de vibração, entre outros.

Por fim, embora o estudo tenha se concentrado na análise dos períodos de ocupação das salas (períodos letivos), é relevante considerar que a quantificação e análise dos períodos de

não ocupação poderiam fornecer insights sobre variações nesse intervalo de tempo, potencialmente aprimorando a eficácia das ações voltadas à melhoria da QAI e da eficiência energética nesses períodos.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, A. J.; DE LA HOZ-TORRES, M. L.; RUIZ, D. P.; MARTÍNEZ-AIRES, M. D. Monitoring and Assessment of Indoor Environmental Conditions in Educational Building Using Building Information Modelling Methodology. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Switzerland, v. 19, n. 21, p. 13756, 2022. DOI: 10.3390/ijerph192113756.
- AL HERR, Y.; ARIF, M.; KATAFYGIOTOU, M.; MAZROEI, A.; KAUSHIK, A.; ELSARRAG, E. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. **International Journal of Sustainable Built Environment**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 1–11, 2016. DOI: 10.1016/j.ijse.2016.03.006.
- ALMEIDA, R. M. S. F.; RAMOS, N. M. M.; DE FREITAS, V. P. Thermal comfort models and pupils' perception in free-running school buildings of a mild climate country. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 111, p. 64–75, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.066.
- APTE, M. G.; ERDMANN C. A. **Indoor carbon dioxide concentrations, VOCs, environmental sensitivity association with mucous membrane and lower respiratory sick building syndrome symptoms in the base study: analyses of the 100 building dataset**. California: Indoor Environment Group, 2002. Disponível em: <https://indoor.lbl.gov/publications/indoor-carbon-dioxide-1>. Acesso em: 29 abr. 2025.
- BARKMANN, C.; WESSOLOWSKI, N.; SCHULTE-MARKWORT, M. Applicability and efficacy of variable light in schools. **Physiology & Behavior**, [S. l.], v. 105, n. 3, p. 621–627, 2012. DOI: 10.1016/j.physbeh.2011.09.020.
- BOYCE, P. R. **Human Factors in Lighting**. 3. rd. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- BRINK, H. W.; LOOMANS, M. G. L. C.; MOBACH, M. P.; KORT, H. S. M. A systematic approach to quantify the influence of indoor environmental parameters on students' perceptions, responses, and short-term academic performance. **Indoor Air**, [S. l.], v. 32, n. 10, p. 1–19, 2022. DOI: 10.1111/ina.13116.
- CASTILLA, N.; LLINARES, C.; BRAVO, J. M.; BLANCA, V. Subjective assessment of university classroom environment. **Building and Environment**, [S. l.], v. 122, p. 72–81, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.06.004.
- CATALINA, T.; GHITA, S. A.; POPESCU, L. L.; POPESCU, R. Survey and measurements of indoor environmental quality in urban/rural schools located in Romania. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 19, n. 16, p. 10219, 2022. DOI: 10.3390/ijerph191610219.

CHATZIDIAKOU, L.; MUMOVIC, D.; DOCKRELL, J. **The effects of thermal conditions and indoor air quality on health, comfort and cognitive performance of students.** London: The Bartlett, 2014.

CHERYAN, S.; ZIEGLER, S. A.; PLAUT, V. C.; MELTZOFF, A. N. Designing classrooms to maximize student achievement. **Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 4–12, 2014. DOI: 10.1177/2372732214548677.

DIREÇÃO-GERAL DA ADMINISTRAÇÃO ESCOLAR. **Normas para concepção e construção de escolas básicas.** Portugal: DGAE, 2004. Disponível em: http://www.centroescolar.min-edu.pt/np4/file/9/programa_ii.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

EARTHMAN, G. I. **School facility conditions and student academic achievement.** Los Angeles: UCLA's Institute for Democracy, 2002. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/5sw56439>. Acesso em: 29 abr. 2025.

EARTHMAN, G. I. **Prioritization of 31 criteria for an adequate school building.** Baltimore: American Civil Liberties Union, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239605533_Prioritization_of_31_criteria_for_school_building_adequacy. Acesso em: 29 abr. 2025.

GRIFFITHS, M.; EFTEKHARI, M. Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 40, n. 4, p. 556–560, 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.04.013.

INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. **Boletim climático Portugal Continental – Maio/2022.** Lisboa: IPMA, 2022. Disponível em: https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20220608/doEOrQOHPDDWhISEKCGO/cli_20220501_20220531_pcl_mm_co_pt.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

JAIN, N. *et al.* Building performance evaluation: Balancing energy and indoor environmental quality in a UK school building. **Building Services Engineering Research and Technology**, [S. l.], v. 41, n. 3, p. 343–360, 2020. DOI: 10.1177/0143624419897397.

LEWINSKI, P. Effects of classrooms' architecture on academic performance in view of telic versus paratelic motivation: a review. **Frontiers in Psychology**, Lausanne, v. 6, p. 1–5, 2015. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00746.

LIU, S.; YOSHINO, H.; MOCHIDA, A. A measurement study on the indoor climate of a college classroom. **International Journal of Ventilation**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 251–261, 2011. DOI: 10.1080/14733315.2011.11683953.

MOHAMED, S.; RODRIGUES, L.; OMER, S.; CALAUTIT, J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 250, p. 111291, 2021. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111291.

MOLDOVEANU, A. M. Biological Contamination of Air in Indoor Spaces. *In*: NEJADKOORKI, F. (org.). **Current Air Quality Issues**, [S. l.], p. 489–514, 2015. DOI: 10.5772/59727.

NAKAOKA, H.; SUZUKI, N.; EGUCHI, A.; MATSUZAWA, D.; MORI, C. Impact of exposure to indoor air chemicals on health and the progression of building-related symptoms: a case report. **Sustainability**, [S. l.], v. 14, n. 21, p. 14421, 2022. DOI: 10.3390/su142114421.

PARQUE ESCOLAR. **Especificações Técnicas de Arquitetura para Projeto do Edifício Escolar**. [S. l.], Parque Escolar, 2017. Disponível em: <https://construcaopublica.gov.pt/docs/site/pt/programa/Parque-Escolar-Manual-Especificacoes-Tecnicas-Arquitetura.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2025.

PEDRO, N.; SARDINHA, L.; PIEDADE, J.; CRUZ, E.; AGONÁCS, N.; PEDRO, A.; RODRIGUES, A. L. Digital Technologies and Innovative Learning Environments: a project for studying its impact on Students' performance and wellbeing. *In: International Technology, Education and Development Conference*, 17., 2023, Valença. **Proceedings** [...]. Valença: IATED, 2023. p. 8031–8040.

PORTUGAL. Portaria n.º 353, de 4 de dezembro. Ministério do Ambiente. **Diário da República**: 1.ª série, n. 235, p. 6644(2)-6644(9), 2013. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/353-2013-484380>. Acesso em: 29 abr. 2025.

PULIMENO, M.; PISCITELLI, P.; COLAZZO, S.; COLAO, A.; MIANI, A. Indoor air quality at school and students' performance: recommendations of the UNESCO chair on health education and sustainable development & the Italian society of environmental medicine (SIMA). **Health Promotion Perspectives**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 169–174, 2020. DOI: 10.34172/hpp.2020.29.

ROSKOS, K.; NEUMAN, S. B. The classroom environment. **The Reading Teacher**, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 110–114, 2011. DOI: 10.1002/TRTR.01021.

SAMANI, S. A.; SAMANI, S. A. The Impact of Indoor Lighting on Students' Learning Performance in Learning Environments: A knowledge internalization perspective. **International Journal of Business and Social Science**, [S. l.], v. 3, n. 24, p. 127–136, 2012.

SCHNEIDER, M. **Linking School Facility Conditions to Teacher Satisfaction and Success**. Washington: National Clearinghouse for Educational Facilities, 2003. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ED480552>. Acesso em: 29 abr. 2025.

TRAN, M. T.; WEI, W.; DASSONVILLE, C.; MARTINSONS, C.; DUCRUET, P.; MANDIN, C.; HÉQUET, V.; WARGOCKI, P. Review of parameters measured to characterize classrooms' indoor environmental quality. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 2, p. 433, 2023. DOI: 10.3390/buildings13020433.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. **Building and Environment**, [S. l.], v. 59, p. 581–589, 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007.

YANG, Z.; BECERIK-GERBER, B.; MINO, L. A study on student perceptions of higher education classrooms: Impact of classroom attributes on student satisfaction and performance. **Building and Environment**, [S. l.], v. 70, p. 171–188, 2013. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.030.

ZHONG, L.; YUAN, J.; FLECK, B. Indoor Environmental Quality Evaluation of Lecture Classrooms in an Institutional Building in a Cold Climate. **Sustainability**, [S. l.], v. 11, n. 23, p. 6591, 2019. DOI: 10.3390/su11236591.

ZHONG, S.; LALANNE, D.; ALAVI, H. The complexity of indoor air quality forecasting and the simplicity of interacting with it – a case study of 1007 office meetings. *In*: Chi conference on human factors in computing systems, 21, 2021, Yokohama, Japan. **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2021. p. 1–19.

ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M.; HAFEZI, M. Thermal comfort in educational buildings: A review article. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 59, p. 895–906, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.033.

CRediT Author Statement

- ☐ **Reconhecimento:** Nenhum.
 - ☐ **Financiamento:** Este trabalho foi financiado por fundos nacionais, através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), I.P., no âmbito da Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Educação e Formação (UIDB/04107/2020, <https://doi.org/10.54499/UIDB/04107/2020>). O estudo insere-se no projeto de investigação “Classroom 4.0 – well-being resources: research and development of school furniture solutions that influence and monitor students’ well-being and health in the classroom, promoting conditions for superior academic performance” (Ref. POCI-01-0247-FEDER-047130/LISBOA-01-0247-FEDER-047130), cofinanciado pelo Lisboa 2020, COMPETE 2020, Portugal 2020 e pela União Europeia (FEDER).
 - ☐ **Conflitos de interesse:** Não há conflitos de interesse a declarar.
 - ☐ **Aprovação ética:** O estudo decorreu no âmbito do projeto acima referido, tendo sido submetido ao Comitê de Ética do Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, que emitiu parecer favorável.
 - ☐ **Disponibilidade de dados e material:** Material suplementar disponível.
 - ☐ **Contribuições dos autores:** Neuza Pedro: contribuiu para o planeamento da recolha de dados e para a gestão geral do projeto que viabilizou essa etapa; supervisionou a análise dos dados e a produção dos resultados; participou da elaboração das conclusões; selecionou elementos-chave para a revisão da literatura; fez a revisão final do manuscrito e a adaptação às normas da revista. Edson Pimentel: foi responsável pela preparação dos dados, realização das análises e apresentação dos resultados; estruturou os pontos centrais do enquadramento e redigiu a versão preliminar das conclusões. Demais autores: colaboraram em diferentes fases do desenvolvimento do estudo e da redação do artigo, especialmente na concepção, definição metodológica, interpretação e discussão dos resultados, além da revisão geral da versão final.
-

Processamento e editoração: Editora Ibero-Americana de Educação
Revisão, formatação, normalização e tradução

