

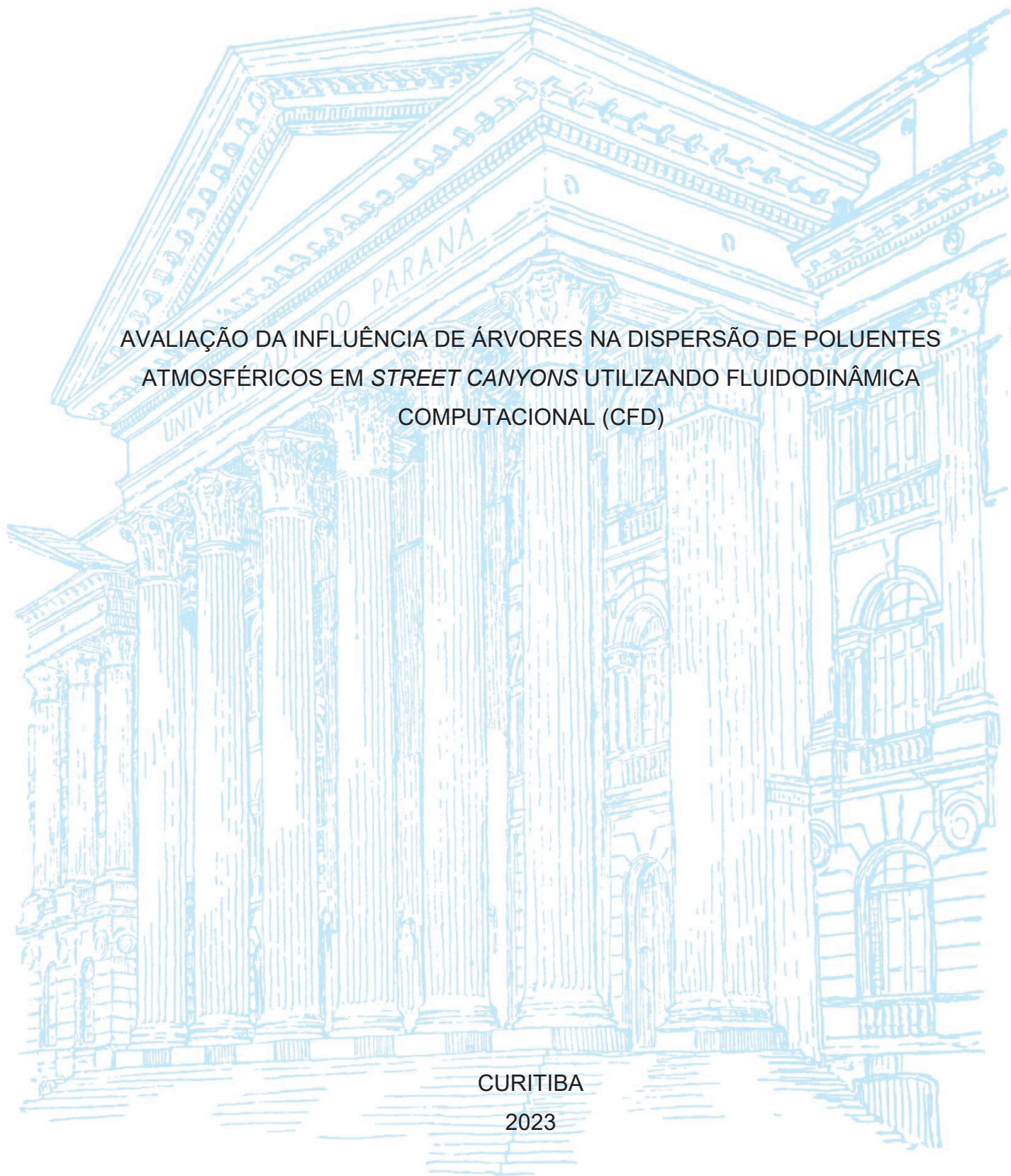
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMELY GONÇALVES ZAZE

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ÁRVORES NA DISPERSÃO DE POLUENTES  
ATMOSFÉRICOS EM *STREET CANYONS* UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL (CFD)

CURITIBA

2023



EMELY GONÇALVES ZAZE

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ÁRVORES NA DISPERSÃO DE POLUENTES  
ATMOSFÉRICOS EM *STREET CANYONS* UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL (CFD)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Nacional (SENAI) e a Universität Stuttgart da Alemanha, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Pablo Devecchi

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Zaze. Emely Gonçalves

Avaliação da influência de árvores na dispersão de poluentes atmosféricos em Street Canyons utilizando fluidodinâmica computacional (CFD). / Emely Gonçalves Zaze. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e a Universität Stuttgart (Alemanha).

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Pablo Devecchi

1. Ar – Poluição. 2. Dióxido de carbono. 3. Dispersão. I. Kolicheski, Mônica Beatriz II. Devecchi, Fernando Pablo. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. IV. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. V. Universität Stuttgart. VI. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **EMELY GONÇALVES ZAZE** intitulada: **Avaliação da Influência de Árvores na Dispersão de Poluentes Atmosféricos em Street Canyons utilizando Fluidodinâmica Computacional (CFD)**, sob orientação da Profa. Dra. MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/04/2023 17:35:48.0

MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/04/2023 21:59:04.0

RODRIGO CESAR RAIMUNDO

Avaliador Interno (FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CURITIBA)

Assinatura Eletrônica

27/04/2023 20:53:21.0

ALTAIR ROSA

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Profa. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski e Prof. Dr. Fernando Pablo Devecchi, pelo seu apoio constante e valiosas contribuições para a realização deste trabalho.

Ao projeto “O Ar Que Respiramos”, em particular ao Victor Augusto Silva e Patrick Alves Bastos, por sua colaboração nas pesquisas e simulações no *software* de estudo.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof. Msc. Mauricy Kawano, Prof. Dr. Altair Rosa e Prof. Dr. Rodrigo Cesar Raimundo, por suas contribuições significativas neste estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI), cujas disciplinas foram fundamentais para o meu aprendizado.

Ao Departamento de Informática (DInf) por fornecer acesso ao servidor da universidade, o que viabilizou a realização das simulações.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) Paraná e à Universidade de Stuttgart por proporcionarem a oportunidade de realizar meu mestrado.

A minha família pelo incentivo constante e apoio incondicional ao longo dessa jornada acadêmica.

## RESUMO

Dados de 2019 revelam que mais de 90% da população mundial vive em áreas com níveis de poluição do ar acima dos limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS). A atividade humana, especialmente em áreas urbanas com alta concentração de indústrias e tráfego de veículos, tem sido a principal causa da degradação da qualidade do ar e contribui para as mudanças climáticas. O conhecimento da dispersão de poluentes do ar em grandes centros urbanos é importante para mudar o cenário atual e melhorar o bem-estar e a saúde da população. Dessa forma, neste estudo, foi desenvolvido um modelo de dispersão de dois tipos de poluentes do ar: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e material particulado fino ( $\text{MP}_{2,5}$ ) em um *street canyon* hipotético. Os conceitos de fluidodinâmica computacional (CFD) e as ferramentas do software *Open Source Field Operation and Manipulation* (OpenFOAM) foram empregados para realizar simulações considerando diferentes cenários, que incluíram a presença ou ausência de árvores. O objetivo foi investigar o impacto da arborização na ventilação natural, dispersão e influência nas concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{MP}_{2,5}$ . O comportamento dos poluentes foi modelado usando as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) e com o modelo de turbulência k- $\epsilon$ . Para a geração da geometria e domínio computacional, utilizou-se o *software* Salome, enquanto o OpenFOAM foi empregado para gerar a malha e executar os cálculos das equações matemáticas. Os resultados das simulações foram visualizados com o *software* ParaView e demonstraram que os efeitos aerodinâmicos são mais significativos em cenários com velocidade inicial do vento de 1 m/s e direção paralela ao eixo principal da rua. Além disso, a presença de árvores mostrou-se relevante na redução das concentrações dos poluentes avaliados. Essas descobertas destacam a importância da arborização e de estratégias de mitigação da poluição para melhorar a qualidade do ar em *street canyons*. Recomenda-se a realização de estudos adicionais considerando as características específicas de cada contexto urbano, assim como o uso de dados reais de monitoramento, para obter resultados mais embasados e precisos.

Palavras-chave: Modelo de dispersão. Dióxido de carbono. Material particulado. OpenFOAM. Poluição do ar.

## ABSTRACT

Data from 2019 reveal that over 90% of the world's population lives in areas with air pollution levels above the limits established by the World Health Organization (WHO). Human activity, especially in urban areas with a high concentration of industries and vehicle traffic, has been the main cause of air quality degradation and contributes to climate change. Understanding the dispersion of air pollutants in large urban centers is important to change the current scenario and improve the well-being and health of the population. Thus, in this study, a dispersion model for two types of air pollutants, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), was developed in a hypothetical street canyon. Computational fluid dynamics (CFD) concepts and tools from the Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) software were employed to conduct simulations considering different scenarios, including the presence or absence of trees. The aim was to investigate the impact of urban greening on natural ventilation, dispersion, and influence on CO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations. The behavior of pollutants was modeled using the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) and the k-epsilon turbulence model. The Salome software was used for geometry and computational domain generation, while OpenFOAM was employed to generate the mesh and perform the mathematical calculations. The simulation results were visualized using ParaView software and demonstrated that aerodynamic effects are more significant in scenarios with an initial wind speed of 1 m/s and direction parallel to the main axis of the street. Furthermore, the presence of trees proved to be relevant in reducing the concentrations of the evaluated pollutants. These findings highlight the importance of urban greening and pollution mitigation strategies to improve air quality in street canyons. Further studies are recommended, considering the specific characteristics of each urban context, as well as the use of real monitoring data, to obtain more informed and accurate results.

Keywords: Dispersion model. Carbon dioxide. Particulate material. OpenFOAM. Air pollution.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – GEOMETRIA DO <i>STREET CANYON</i> .....	28
FIGURA 2 – ESTRUTURAS DE VÓRTICE.....	29
FIGURA 3 – VETORES DE VELOCIDADE MÉDIA .....	30
FIGURA 4 – MODELO DE DOSSEL URBANO.....	31
FIGURA 5 – DISPERSÃO DE POLUENTES NO <i>CANYON</i> .....	32
FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS VÓRTICES EM UM <i>CANYON</i> COM A VEGETAÇÃO .....	33
FIGURA 7 – INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA DISPERSÃO DE POLUENTES EM UM <i>CANYON</i> URBANO .....	34
FIGURA 8 – MODELO DE TÚNEL DE VENTO .....	37
FIGURA 9 – ELEMENTOS DO PROCESSO CFD .....	39
FIGURA 10 – DOMÍNIO COMPUTACIONAL .....	41
FIGURA 11 – REFINAMENTO DA MALHA NA REGIÃO DE INTERESSE.....	42
FIGURA 12 – SEQUÊNCIA DE TRABALHO NO OPENFOAM.....	44
FIGURA 13 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DO OPENFOAM COM RELAÇÃO AOS DEMAIS <i>SOFTWARES</i> EXISTENTES .....	44
FIGURA 14 – ETAPAS PARA CRIAR UM CASO NO OPENFOAM .....	45
FIGURA 15 – GEOMETRIA DA RUA HIPOTÉTICA .....	53
FIGURA 16 – SEÇÃO LONGITUDINAL.....	55
FIGURA 17 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES - CO <sub>2</sub> .....	60
FIGURA 18 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS - CO <sub>2</sub> .....	61
FIGURA 19 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES OBLÍQUOS - CO <sub>2</sub> .....	61
FIGURA 20 – VALIDAÇÃO DO FLUXO DO AR: VELOCIDADE INICIAL ATÉ 1,0 m/s .....	64
FIGURA 21 – VALIDAÇÃO DO FLUXO DO AR: VELOCIDADE A PARTIR DE 2,0 m/s .....	64
FIGURA 22 - VALIDAÇÃO DO CAMPO DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ..	65



FIGURA 23 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0,1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	68
FIGURA 24 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0,1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	69
FIGURA 25 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	70
FIGURA 26 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	71
FIGURA 27 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	72
FIGURA 28 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	73
FIGURA 29 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	77
FIGURA 30 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	78
FIGURA 31 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	79
FIGURA 32 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	80
FIGURA 33 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;2;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	81

FIGURA 34 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;2;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA .....	82
FIGURA 35 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0,1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	87
FIGURA 36 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0,1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	88
FIGURA 37 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	89
FIGURA 38 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	90
FIGURA 39 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	91
FIGURA 40 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA.....	92
FIGURA 41 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	95
FIGURA 42 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA .....	96
FIGURA 43 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	97
FIGURA 44 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP <sub>2,5</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA .....	98

FIGURA 45 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE $MP_{2,5}$ ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS $U = (0;2;0)$ - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA.....	99
FIGURA 46 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE $MP_{2,5}$ ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS $U = (0;2;0)$ - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA .....	100
FIGURA 47 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES: DIREÇÃO DO VENTO PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA.....	102
FIGURA 48 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES: DIREÇÃO DO VENTO PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA.....	103

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DIRETRIZES DA QUALIDADE DO AR ESTIPULADAS PELA OMS..	24
QUADRO 2 – ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQA <sub>r</sub> ).....	25
QUADRO 3 – RELAÇÃO DO IQA <sub>r</sub> COM POSSÍVEIS EFEITOS À SAÚDE.....	25
QUADRO 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS CANYONS.....	28
QUADRO 5 – CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS NO OPENFOAM .....	51
QUADRO 6 – CONDIÇÕES INICIAIS APLICADAS NO OPENFOAM: TESTES PRELIMINARES.....	54
QUADRO 7 – CONDIÇÕES INICIAIS APLICADAS NO OPENFOAM: SIMULAÇÕES DE CO <sub>2</sub> E MP <sub>2,5</sub> .....	57

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES PARA CO <sub>2</sub> : SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA .....	59
TABELA 2 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES .....	62
TABELA 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO <sub>2</sub> .....	67
TABELA 4 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> NA PRESENÇA DE ÁRVORES .....	67
TABELA 5 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO <sub>2</sub> : PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (90°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS .....	74
TABELA 6 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO <sub>2</sub> : PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (0°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS .....	84
TABELA 7 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP <sub>2,5</sub> .....	85
TABELA 8 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MP <sub>2,5</sub> NA PRESENÇA DE ÁRVORES .....	86
TABELA 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP <sub>2,5</sub> : PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (90°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS .....	93
TABELA 10 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP <sub>2,5</sub> : PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (0°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFD	- Dinâmica dos Fluidos Computacional
CO	- Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
IQAr	- Índice de Qualidade do Ar
LES	- <i>Large Eddy Simulation</i>
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MP	- Material Particulado
MP <sub>10</sub>	- Material Particulado com diâmetro inferior a 10 µm
MP <sub>2,5</sub>	- Material Particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm
NO <sub>2</sub>	- Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	- Óxidos de Nitrogênio
O <sub>3</sub>	- Ozônio
OpenFOAM	- <i>Open Source Field Operation and Manipulation</i>
OMS	- Organização Mundial da Saúde
PF	- Padrão Final
PI	- Padrão Intermediário
PTS	- Partículas Totais em Suspensão
RANS	- <i>Reynolds-averaged Navier-Stokes equations</i>
SO <sub>2</sub>	- Dióxido de Enxofre
SO <sub>x</sub>	- Óxidos de Enxofre
WHO	- <i>World Health Organization</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

- H - altura
- L - comprimento
- C - concentração do poluente
- $C_U$  - constante do modelo
- n - densidade de povoamento
- $k$  - energia cinética turbulenta
- $l$  - escala de comprimento de turbulência
- W - largura
- m - metro
- $m^3$  - metro cúbico
- $\mu\text{g}$  - micrograma
- $\mu\text{m}$  - micrometro
- Re - número de Reynolds
- $P_{\text{vol}}$  - porosidade da copa
- p - pressão cinemática
- kg - quilograma
- s - segundo
- $\varepsilon$  - taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
- $\bar{U}_i$  - valor médio da velocidade do vento
- $U'_i$  - valor médio da velocidade do vento (flutuação)
- U - velocidade
- $U_i$  - velocidade do vento
- v - viscosidade turbulenta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.1.1 Objetivo geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
2.1 POLUIÇÃO DO AR NAS GRANDES CIDADES.....	21
2.1.1 Emissões do tráfego de veículos.....	21
2.1.2 Poluentes atmosféricos, legislação e monitoramento da qualidade do ar .....	22
2.2 DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM ÁREAS URBANAS.....	26
2.2.1 Street canyon e avenue canyon .....	27
2.2.2 Ventilação natural.....	31
2.2.3 Influência da vegetação na dispersão de poluentes.....	33
2.3 MODELOS DE DISPERSÃO.....	36
2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	38
2.4.1 Modelagem da dispersão de poluentes por CFD .....	38
2.4.2 Geometria, domínio computacional e malha de uma simulação .....	41
2.4.3 Uso do OpenFOAM para simulação de modelos em CFD .....	43
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
3.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO E APLICAÇÃO NO OPENFOAM.....	48
3.2.1 Condições de contorno.....	50
3.2 TESTES DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO DE DISPERSÃO ADOTADO ....	52
3.2.2.1 Criação da geometria, domínio computacional e malha.....	52
3.2.2.2 Definição das condições iniciais.....	54
3.2.2.3 Pós-processamento dos resultados .....	54
3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO .....	55
3.4 SIMULAÇÕES DA DISPERSÃO DE CO <sub>2</sub> E MP <sub>2,5</sub> .....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>59</b>
4.1 TESTES PRELIMINARES PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO MODELO ADOTADO.....	59
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	63



4.3 SIMULAÇÕES DE POLUENTES EM CENÁRIOS COM E SEM ÁRVORES .....	66
4.3.1 Resultados das simulações de CO <sub>2</sub> .....	66
4.2.2 Resultados das simulações de MP <sub>2,5</sub> .....	85
4.2.3 Avaliação da remoção de poluentes.....	102
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico está intrinsecamente ligado ao processo de urbanização das cidades. Após a última revolução industrial, observa-se uma rápida expansão das atividades industriais, comerciais e construtivas nas áreas urbanas centrais. Contudo, a falta de planejamento urbano adequado provoca impactos diretos na qualidade do ar, principalmente devido ao aumento do tráfego de veículos e à construção de arranha-céus para atender à crescente demanda habitacional dos grandes centros urbanos. Essa situação ocasiona a formação de zonas de canalização do vento, conhecidas como *street canyons* (cânions urbanos), que apresentam um potencial elevado de concentração de poluentes atmosféricos. Tal cenário é consequência da falta de medidas para aprimorar a ventilação e a retenção de contaminantes nessas áreas.

Os poluentes são liberados por fontes móveis, como veículos, ou por fontes fixas, como chaminés industriais. A presença de um intenso tráfego de veículos nas áreas urbanas resulta em concentrações mais elevadas de poluentes nas vias, uma vez que esses poluentes são transportados desde o ponto de emissão, como o escapamento do veículo, para as áreas adjacentes, como calçadas, estabelecimentos comerciais e edifícios próximos. A dispersão desses poluentes é influenciada por fatores meteorológicos locais, incluindo a direção e velocidade do vento, bem como pelas características das construções na região, como a altura dos edifícios e os obstáculos presentes nas vias, como lombadas e semáforos.

Os pedestres, incluindo ciclistas, motoristas e residentes próximos a áreas urbanas ou indústrias, são frequentemente afetados pela poluição atmosférica. É importante ressaltar que estudos de avaliação de risco à saúde têm estabelecido níveis máximos diários e anuais de exposição aos principais poluentes atmosféricos para esses indivíduos. Exposições contínuas a concentrações acima dos limites estipulados podem acarretar doenças graves e até mesmo resultar em óbito (EPA, 2023).

A poluição atmosférica representa um desafio ambiental significativo enfrentado pelo planeta no século XXI, devido aos numerosos impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), as doenças cardiovasculares e respiratórias não transmissíveis, que têm como principal causa a poluição do ar, são responsáveis pela maioria das mortes em escala

global. Além disso, observa-se um aumento nas infecções respiratórias, bem como complicações como nascimentos prematuros e óbitos de bebês e crianças (WHO, 2021).

A poluição do ar é responsável por aproximadamente 9 milhões de mortes por ano (FULLER, 2022). Segundo a *Academy of Science of South Africa et al.* (2019), apesar da contribuição significativa das fontes móveis para a poluição do ar e seu impacto na saúde humana, as estratégias políticas muitas vezes não consideram alternativas mais sustentáveis devido ao alto custo no curto prazo.

A mitigação da poluição em ambientes urbanos requer a implementação de estratégias que abordem tanto a quantidade de poluentes liberados quanto a intensidade de suas emissões, além do percurso pelo qual esses poluentes alcançam o receptor (JEANJEAN et al., 2017). Dentre as estratégias adotadas, destacam-se técnicas recentes que têm se mostrado eficazes no controle dessa trajetória, como o aprimoramento da dispersão aerodinâmica das emissões, que se apresenta como uma abordagem promissora para reduzir a exposição aos poluentes (JEANJEAN; MONKS; LEIGH, 2016).

Além disso, a deposição dos poluentes em superfícies, como as folhas das árvores, também pode contribuir para o controle da poluição, apresentando-se como uma estratégia adicional. Essas abordagens oferecem perspectivas importantes para enfrentar os desafios da poluição atmosférica em áreas urbanas e são relevantes para este trabalho que visa analisar especificamente a influência das árvores na dispersão de poluentes em *street canyons*

O uso de *softwares* para a modelagem de poluentes do ar tem como objetivo avaliar a dispersão destes em uma região específica. Essas ferramentas permitem simular cenários e analisar alternativas viáveis, como o uso estratégico de vegetação e a modificação das características das ruas, para controlar a poluição do ar. Baseados em modelos matemáticos que consideram fatores como topografia, meteorologia e fontes de emissão, esses *softwares* auxiliam na tomada de decisões estratégicas para melhorar a qualidade do ar e proteger a saúde pública.

Com estas premissas o objetivo deste estudo foi avaliar a influência das árvores na ventilação natural e na dispersão de poluentes em um *street canyon*. Para isso, foram realizadas simulações numéricas usando modelagem de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) com o *software* Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM). Foram investigados cenários com e sem árvores, considerando

diferentes direções e velocidades iniciais do vento, para analisar o fluxo e a dispersão de dois poluentes distintos em uma rua hipotética. Durante as simulações, foram levados em conta os principais efeitos aerodinâmicos e características da vegetação.

A construção da geometria hipotética e do modelo de dispersão foram realizadas para viabilizar as simulações. Os resultados foram validados por meio de comparações com estudos prévios existentes. A inclusão de árvores foi avaliada como uma opção viável, de baixo custo e de fácil implementação para reduzir a concentração de poluentes em um *street canyon*. Este estudo contribuiu para uma melhor compreensão dos efeitos das árvores na dispersão de poluentes e forneceu informações importantes para o planejamento urbano e a mitigação da poluição atmosférica em áreas urbanas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto de árvores na ventilação natural e dispersão de poluentes ( $\text{CO}_2$  e  $\text{MP}_{2,5}$ ) em uma rua hipotética.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Construir um modelo de dispersão que inclua os efeitos da turbulência, da vegetação e da emissão de poluentes por veículos para ser aplicado no *software* OpenFOAM;
- b) Testar o modelo de dispersão construído simulando o comportamento de um poluente gasoso, a partir da modelagem de um *street canyon* hipotético;
- c) Validar o modelo testado com resultados de outros autores;
- d) Simular a dispersão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e material particulado ( $\text{MP}_{2,5}$ ) para cenários com e sem a presença de árvores.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados tópicos que introduzem o problema da poluição atmosférica nas grandes cidades decorrentes das emissões do tráfego de veículos, em seguida será apresentado o conceito de dispersão de poluentes atmosféricos e as principais variáveis que influenciam no processo e, por fim, será abordado sobre CFD que possibilitou a realização da modelagem dos poluentes atmosféricos em uma rua hipotética.

### 2.1 POLUIÇÃO DO AR NAS GRANDES CIDADES

A poluição do ar tem origem nas emissões de poluentes causadas pelas atividades humanas, principalmente em centros urbanos que possuem uma elevada quantidade de veículos e indústrias (SANTOS *et al.*, 2021). A poluição do ar foi identificada como a maior ameaça do meio ambiente a saúde humana (WHO, 2021), reduzindo a expectativa de vida (LELIEVELD *et al.*, 2015).

Em países de baixa e média renda, o desenvolvimento econômico acelerado juntamente com a urbanização levam a uma piora na qualidade do ar (WHO, 2021). Várias doenças que estão relacionadas ao sistema respiratório e circulatório contribuem para a elevação das taxas de morbidade e mortalidade (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2011). As atividades humanas que interferem no meio ambiente são cada vez mais intensas e não consideram os impactos ambientais, refletindo no aumento da poluição atmosférica (DERISIO, 2012).

Em razão do progresso da China nos últimos 40 anos foram observados problemas de poluição ambiental, principalmente pela deterioração da qualidade do ar nas áreas urbanas (LIU; ZHANG, 2021). Em 2013, a China registrou as mais altas concentrações de MP<sub>2,5</sub>, a concentração média chegou a 52,4 µg/m<sup>3</sup> ultrapassando dez vezes a quantidade determinada como segura pela OMS em 2021 (BBC, 2022).

#### 2.1.1 Emissões do tráfego de veículos

A principal fonte de poluição do ar nas cidades são as emissões do tráfego de veículos (KUMAR *et al.*, 2015; WADLOW *et al.*; 2019), afetando aqueles que residem próximo das ruas, além de pedestres e ciclistas (HOFMAN *et al.*, 2013). As emissões

de poluentes geradas por veículos são influenciadas por alguns fatores, como a tecnologia do veículo, estilo de condução do motorista, a infraestrutura viária e as leis de trânsito (NUNZIO; LARAKI; THIBAUT, 2020).

As emissões gasosas e até as partículas provenientes do processo de combustão, o desgaste dos freios e pneus e a poeira da rua em suspensão colaboram para a degradação da qualidade do ar (BUCCOLIERI *et al.*, 2009). Durante a partida e aceleração dos veículos os escapamentos emitem partículas (poeira), assim como em congestionamentos quando se formam partículas devido ao superaquecimento do sistema de tratamento de gases de escape dos veículos (SIEDLECKI *et al.*, 2017).

Em regiões intensamente povoadas a troca de ar entre o nível da rua e o vento atmosférico acima do telhado das edificações é limitada, ocasionando na permanência dos poluentes no nível da rua devido à dificuldade dos ventos em diluir e remover os poluentes próximos ao solo (GROMKE *et al.*, 2008).

Segundo Tomson *et al.* (2021), os principais poluentes atmosféricos decorrentes da poluição do trânsito são os materiais particulados (MP) e poluentes gasosos, como o monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

### 2.1.2 Poluentes atmosféricos, legislação e monitoramento da qualidade do ar

Segundo a CETESB (2021), o poluente é qualquer substância que se encontra no ar e de acordo com a sua concentração, pode alterar a qualidade do ar tornando-o impróprio, ofensivo ou nocivo ao meio ambiente e à saúde humana. Pode ainda ser inconveniente ao bem-estar público e causando danos nas superfícies das estruturas, impactos diretos na fauna e flora e prejudicando o desenvolvimento das atividades rotineiras da sociedade.

Os poluentes que mais impactam na saúde humana são os gases (dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>) e o MP, eles são emitidos em uma fonte móvel ou fixa e podem ser transportados pelo vento para longe da fonte de emissão (BASÍŃSKA *et al.*, 2021). Dentre esses poluentes, destacam-se para este trabalho o CO<sub>2</sub> e MP.

O CO<sub>2</sub> compõe a atmosfera terrestre e é um importante metabólito humano, tem como característica ser um gás incolor e inodoro, ele está presente na concentração de fundo no ar ambiente (cerca de 400 ppm), porém no último século observou-se um aumento dessa concentração devido à industrialização que libera o

gás a partir da combustão de combustíveis fósseis (ZHANG *et al.*, 2016). O CO<sub>2</sub> contribui para o efeito estufa e as mudanças climáticas, juntamente com o MP<sub>2,5</sub> é a principal preocupação ambiental da China atualmente (GUAN *et al.*, 2023).

O MP é composto por uma mistura de partículas de sólidos e gotículas de líquidos que compreendem elementos inorgânicos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, entre outras substâncias (BERINGUI *et al.*, 2021). Pode ser classificado pelo diâmetro aerodinâmico, sendo que todas as partículas possuem diâmetro inferior a 100 µm, os dois diâmetros principais são abaixo de 10 µm (MP<sub>10</sub>), conhecido pela fração grossa que é mais nociva à saúde, e menor que 2,5 µm (MP<sub>2,5</sub>), chamado de porção fina que proporciona um risco ainda maior, pois ocasiona no aumento na mortalidade (6 e 13%) causada por complicações cardiopulmonares (WHO, 2013). A fração menor que 2,5 µm é mais nociva à saúde em comparação as partículas mais grossas (YI *et al.*, 2020).

A qualidade do ar é resultante da interação de diversos fatores, como a emissão do poluente, transporte, dispersão, transformação química e deposição do mesmo, podendo ser influenciada pelas condições meteorológicas como umidade, temperatura e direção do vento (KINNEY, 2008).

No Brasil, os padrões de qualidade do ar foram estabelecidos pela Resolução nº 3, de 28 de junho de 1990, publicada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual foi revogada em 19 de novembro de 2018 pela Resolução nº 491 (CONAMA, 2018). No anexo I da referida resolução são apresentados os padrões de qualidade do ar para os poluentes MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), fumaça, partículas totais em suspensão (PTS) e chumbo (Pb), considerando o período de referência para 1 h, 8 h, 24 h ou anual para os quais foram estabelecidos padrões de qualidade do ar intermediários (PI) a serem cumpridos em três etapas e os padrões finais (PF) que correspondem aos valores guia definidos pela OMS em 2005 (WHO, 2005).

Cabe ressaltar que em 2021 a OMS publicou novos valores-guia para os parâmetros CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>, os quais são apresentados no QUADRO 1. Em comparação aos valores de 2005 os novos valores são mais restritivos, com exceção do parâmetro SO<sub>2</sub> que apresentou aumento do valor médio permitido em 24 horas: de 20 µg/m<sup>3</sup> para 40 µg/m<sup>3</sup> (WHO, 2021).

QUADRO 1 – DIRETRIZES DA QUALIDADE DO AR ESTIPULADAS PELA OMS

Poluente	Tempo de exposição	Diretrizes da Organização Mundial da Saúde (2021)
O <sub>3</sub>	<i>Peak Season</i> <sup>(1)</sup>	60 µg/m <sup>3</sup>
	8 horas	100 µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	1 hora	200 µg/m <sup>3</sup>
	24 horas	25 µg/m <sup>3</sup>
	Anual	10 µg/m <sup>3</sup>
CO	15 minutos	100 mg/m <sup>3</sup>
	1 hora	35 mg/m <sup>3</sup>
	8 horas	10 mg/m <sup>3</sup>
	24 horas	4 mg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	10 minutos	500 µg/m <sup>3</sup>
	24 horas	40 µg/m <sup>3</sup>
MP <sub>10</sub>	24 horas	45 µg/m <sup>3</sup>
	Anual	15 µg/m <sup>3</sup>
MP <sub>2,5</sub>	24 horas	15 µg/m <sup>3</sup>
	Anual	5 µg/m <sup>3</sup>

(1): Seis meses consecutivos do ano com a maior média móvel de ozônio.

FONTE: WHO (2021).

A legislação brasileira estabelece no anexo IV da Resolução nº 491 (CONAMA, 2018) os 6 poluentes atmosféricos necessários (MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>) para o cálculo do índice de qualidade do ar (IQA<sub>r</sub>) e os valores das suas concentrações para ser classificado como “N1 - boa qualidade do ar” (CONAMA, 2018). Cabe destacar que a classe N1 corresponde ao intervalo de 0 até o PF estabelecido, de acordo com o poluente, no período máximo de 24 horas.

Em 2019, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) juntamente com órgãos ambientais estaduais e distritais publicou o “Guia Técnico de Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar”. O guia contém os objetivos, orientações e gestão da implantação das redes de monitoramento do ar, a representatividade temporal dos dados, documentação, métodos de referências e apresenta o IQA<sub>r</sub> que é dividido em cinco classes (N1 a N5) de boa a péssima, sendo que a primeira classe (N1 - Boa) estabelece os mesmos valores do CONAMA (2018), para os 6 poluentes atmosféricos também adotados pelo órgão ambiental, conforme apresentado no QUADRO 2.

A finalidade do IQA<sub>r</sub> é facilitar a leitura dos dados de monitoramento da qualidade do ar pela população, normalizando o valor padrão em valores adimensionais para os poluentes (MMA, 2019). O “Guia Técnico de Monitoramento e



Avaliação da Qualidade do Ar” fornece sugestões sobre a relação de efeitos à saúde associados aos índices estabelecidos, que são apresentados no QUADRO 3.

QUADRO 2 – ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR (IQAr)

Classificação	IQAr	MP <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24h	MP <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24h	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 8h	CO (ppm) 8h	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 1h	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) 24h
<b>N1 BOA</b>	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
<b>N2 MODERADA</b>	41 - 80	> 50 - 100	> 25 - 50	> 100 - 130	> 9 - 11	> 200 - 240	> 20 - 40
<b>N3 RUIM</b>	81 - 120	> 100 - 150	> 50 - 75	> 130 - 160	> 11 - 13	> 240 - 320	> 40 - 365
<b>N4 MUITO RUIM</b>	121 - 200	> 150 - 250	> 75 - 125	> 160 - 200	> 13 - 15	> 320 - 1.130	> 365 - 800
<b>N5 PÉSSIMA</b>	201 - 400	> 250 - 600	> 125 - 300	> 200 - 800	> 15 - 50	> 1130 - 3.750	>800 - 2.620

FONTE: MMA (2019).

QUADRO 3 – RELAÇÃO DO IQAr COM POSSÍVEIS EFEITOS À SAÚDE

Classificação	IQAr	Efeitos
<b>N1 BOA</b>	0 - 40	Nenhum.
<b>N2 MODERADA</b>	41 - 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população em geral não é afetada.
<b>N3 RUIM</b>	81 - 120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
<b>N4 MUITO RUIM</b>	121 - 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
<b>N5 PÉSSIMA</b>	>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

FONTE: Adaptado de MMA (2019).

De acordo com SINGLA *et al.* (2018), os objetivos do monitoramento da qualidade do ar são: disponibilizar dados para a tomada de ações emergenciais em momentos de poluição atmosférica, comparar os valores com os limites estabelecidos pelas legislações, possibilitar o planejamento urbano e monitorar as mudanças e tendências na qualidade do ar de acordo com as emissões de poluentes.

Conforme o levantamento realizado por Vormittag *et al.* (2021), somente 11 estados brasileiros realizam o monitoramento da qualidade do ar por meio de 430 estações de monitoramento, das quais apenas 371 estão ativas. Além disso, a maior parte das estações (80,3%) está localizada na região sudeste. Ressalta-se que o monitoramento abrange poucos territórios e os dados são incompletos ou desatualizados em relação aos poluentes analisados.

O monitoramento de  $MP_{2,5}$  em 24 municípios brasileiros indicou que 16 municípios apresentaram concentração anual superior as diretrizes da OMS no ano de 2016, ocorrendo cerca de 28 mortes evitáveis a cada 100.000 habitantes nas cidades avaliadas no estudo (ANDREÃO; ALBUQUERQUE; KUMAR, 2018).

Schraier (2022) analisou os efeitos das partículas inaláveis ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ ) na saúde da população de Curitiba/PR, utilizando o *software* AirQ+ da OMS para estimar os efeitos de mudanças na qualidade do ar na saúde da população. Foi verificado que se fosse atendida a recomendação da OMS para concentração média anual de  $MP_{2,5}$  para a exposição de longo prazo, em 2018 poderia ter ocorrido uma redução de quase 10% no total de mortes por câncer de brônquios e pulmão. Além disso, o estudo apontou que se em 2017 fosse atendida a recomendação para exposição de curto prazo para o  $MP_{10}$ , haveria redução de 30% dos níveis desse poluente na atmosfera e potencial redução de 5% das mortes por doenças respiratórias.

Quando a qualidade do ar não é classificada como boa, os efeitos adversos da poluição atmosférica influenciam diretamente na saúde humana, animal e na produtividade agrícola (CHOWDHURY *et al.*, 2019). A qualidade do ar é afetada principalmente pela interação entre as condições meteorológicas e as emissões de poluentes atmosféricos. Essa interação pode facilitar a dispersão desses poluentes para locais mais distantes, o que pode afetar a qualidade do ar em outras regiões (DHAKA *et al.*, 2020).

## 2.2 DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM ÁREAS URBANAS

A dispersão de poluentes compreende o transporte, a difusão e a diluição dos poluentes na atmosfera (LENTZ, 2023). As causas básicas para que ocorra a dispersão incluem o efeito da gravidade, a convecção natural devido a diferença de temperatura e a convecção forçada causada pelo fluxo de ar, embora essa última seja a força motriz dominante na maioria dos casos, os outros dois efeitos não podem ser

descartados, principalmente para velocidades do vento mais baixas (LV; WU; ZANG, 2021).

A alteração do *layout*/geometria de uma rua ou dos edifícios no entorno, a ventilação natural, a distribuição de temperatura e os tipos de poluentes podem influenciar na dispersão de poluentes em áreas urbanas, especialmente em de ruas com características de *canyon* (WANG *et al.*, 2019).

A alteração da geometria, por exemplo, pode auxiliar na melhoria da dispersão aerodinâmica, entretanto pode ser uma estratégia muito onerosa. A vegetação realiza o processo de deposição de poluentes, sendo benéfica para redução da concentração de poluentes (FANTOZZI *et al.*, 2015). O tipo de poluente também pode influenciar na dispersão, visto que alguns podem ser mais leves e voláteis, enquanto outros podem ser mais pesados e permanecer no ar por mais tempo (DE SIMONI *et al.*, 2021).

### 2.2.1 Street canyon e avenue canyon

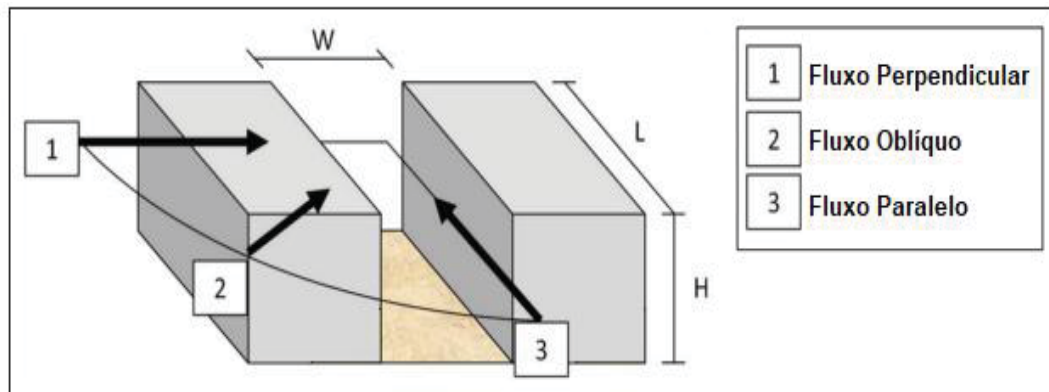
Neste trabalho foi escolhido trabalhar com um *street canyon* devido a sua relevância na compreensão das condições de transporte e qualidade do ar em áreas urbanas. A escolha é justificada para destacar a importância de compreender essa configuração urbana específica e seus efeitos no transporte de poluentes atmosféricos, na poluição do ar e nos impactos à saúde humana e ao meio ambiente. Esse estudo é fundamental para a implementação de medidas de mitigação e melhoria da qualidade do ar em áreas urbanas densamente construídas.

O *street canyon* e o *avenue canyon* são definidos por uma rua ladeada por edifícios em ambos os lados com poucas aberturas nas paredes, ou seja, com pequenos ou nenhum espaçamento entre os edifícios, o que associado ao microclima e ao alto volume de tráfego pode gerar condições de transporte desfavoráveis para a dispersão dos poluentes do ar ocorrendo o aumento do nível de poluição do ar (TOMSOM *et al.*, 2021) e população impactada pelos seus efeitos (EHRNSPERGER; KLEMM, 2022). Os efeitos encontrados em ruas com características de *canyon*, como a redução da ventilação natural, têm como consequência maiores impactos à saúde humana e ao meio ambiente (VOORDECKERS *et al.*, 2021).

O *street canyon* ou *avenue canyon* pode ser considerado como simétrico, se os edifícios têm aproximadamente a mesma altura, ou assimétrico, quando a altura dos edifícios for desigual (FERREIRA, 2013). A dimensão de um *street canyon* ou

*avenue canyon* é definida por sua proporção, sendo a altura (H) dividida pela largura (W). O comprimento (L) indica a distância da via entre duas interseções principais, subdividindo o *street canyon* ou o *avenue canyon* em curto, médio ou longo (YAZID *et al.*, 2014). A FIGURA 1 ilustra a geometria de um *street canyon* e o QUADRO 4 apresenta a classificação dos *canyons*.

FIGURA 1 – GEOMETRIA DO STREET CANYON



FONTE: Adaptado de YAZID *et al.* (2014).

QUADRO 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS CANYONS

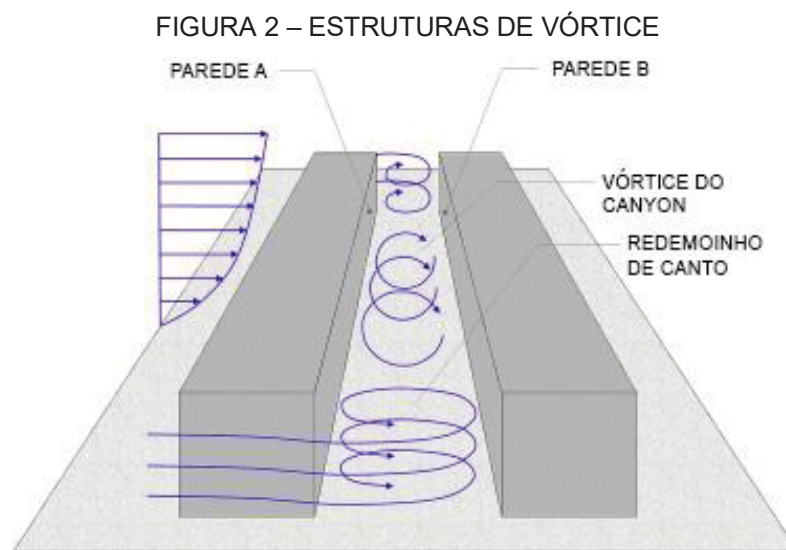
Proporção	Classificação
$H/W \leq 0,5$	<i>Avenue canyon</i>
$0,5 < H/W < 2$	<i>Canyon regular</i>
$H/W \geq 2$	<i>Canyon profundo</i>
$L/W \leq 1$	<i>Canyon curto</i>
$1 < L/W < 5$	<i>Canyon médio</i>
$L/W \geq 5$	<i>Canyon longo</i>

FONTE: Traduzido de YAZID *et al.* (2014).

Em um *street canyon* as concentrações de poluentes dependem da geometria, das características do tráfego de veículos, da estabilidade atmosférica, do efeito de dispersão dos poluentes de ruas adjacentes e da turbulência induzida por ventos predominantes (KUMAR; FENNELL; BRITTER, 2008).

Em *street canyons* sem árvores, o campo de fluxo é sujeito por duas estruturas de vórtice: o vórtice do *canyon* e os redemoinhos dos cantos (FIGURA 2). O vento que passa acima dos telhados impulsiona a formação de um vórtice dentro do *canyon* em rotação, no sentido horário, que arrasta o ar da rua em frente à parede

B de barlavento. No fluxo contrário da parede B para a A, esse vórtice acumula as emissões do tráfego de veículos. Desse modo, o fluxo ascendente em frente a parede A de sotavento possui concentrações de poluentes mais altas que são parcialmente arrastadas e misturam-se com o vento acima do telhado, antes de entrarem novamente no *street canyon*. No fim da rua, os redemoinhos de canto trocam o ar, proporcionando menores concentrações de poluentes (GROMKE, 2011).



FONTE: Traduzido de GROMKE (2011).

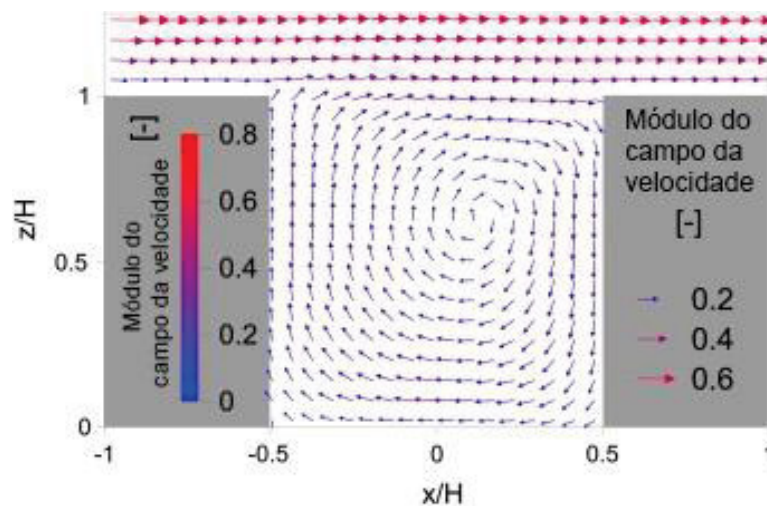
Pugh *et al.* (2012) demonstraram que a presença de vegetação em um *street canyon* aumentou o efeito de deposição do poluente, de modo que as concentrações reduziram - no nível da rua - em até 40% para NO<sub>2</sub> e 60% para MP. Foi verificado que os efeitos aerodinâmicos impactaram mais nos níveis de poluição do ar local, em comparação com os efeitos de deposição do poluente (VOS *et al.*, 2013).

Em modelos de túneis de vento os poluentes são obrigados a passar pela vegetação, o que induz ao aumento da velocidade de deposição permitindo maior tempo de contato e quantidade de poluente para interagir com a vegetação (JANHÄLL, 2015). Entretanto, em condições reais os poluentes somente irão interagir com a superfície da vegetação ao passar em volta ou por cima da copa da árvore (ABHIJITH *et al.*, 2017).

Gromke *et al.* (2008) realizaram estudos experimentais em um túnel de vento, utilizando gás traçador para simular a emissão de gases do escapamento de veículos, dessa forma encontraram diferenças nas concentrações de poluentes nas paredes do

*canyon*, sendo a concentração na parede A quatro vezes superior à parede B. As emissões do escapamento de um veículo são liberadas próximas ao solo e transportadas no sentido horizontal pelo vórtice do *canyon* até a parede A, principalmente no nível do pedestre (GROMKE; RUCK, 2007). Na frente dessa parede, os poluentes sobem e se misturam no fluxo cruzado no nível superior do telhado (FIGURA 3), sendo parcialmente arrastadas novamente para o *canyon* em frente à parede B.

FIGURA 3 – VETORES DE VELOCIDADE MÉDIA



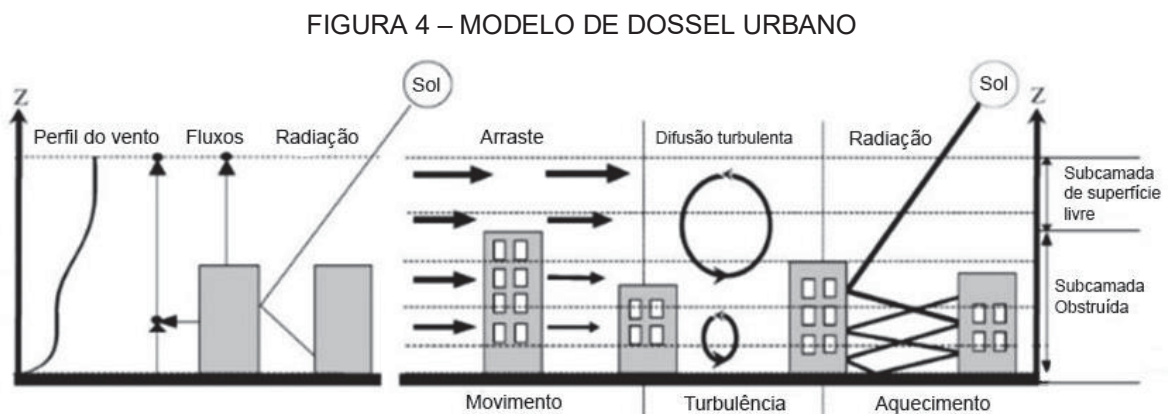
FONTE: Traduzido de GROMKE *et al.* (2008).

Gromke e Ruck (2007) observaram que a concentração de poluentes na parede A é 2,5 vezes maior do que na parede B quando o tráfego de veículos está parado. A ventilação natural permitiu que as concentrações de poluentes reduzissem nas extremidades do *canyon*.

A simulação de um experimento com o tráfego de veículos de mão dupla, mostrou os impactos de turbulência que são induzidos pelo tráfego, onde foi evidenciado um decréscimo na concentração no centro da parede A e um aumento em direção aos cantos, concluindo que o tráfego de veículos permite a mistura aprimorada das emissões dos escapamentos dos veículos dentro do *canyon*, transportando o ar mais poluído do centro do *canyon* para as áreas menos poluídas, como as extremidades da rua (GROMKE; RUCK, 2007).

### 2.2.2 Ventilação natural

A ventilação natural nas cidades pode ser influenciada pela altura dos edifícios e geometria da rua, sendo dividida em duas camadas na vertical (FIGURA 4): subcamada obstruída que é a área do solo até o topo da edificação, e subcamada de superfície livre que é a região acima do telhado (CHEN *et al.*, 2021).



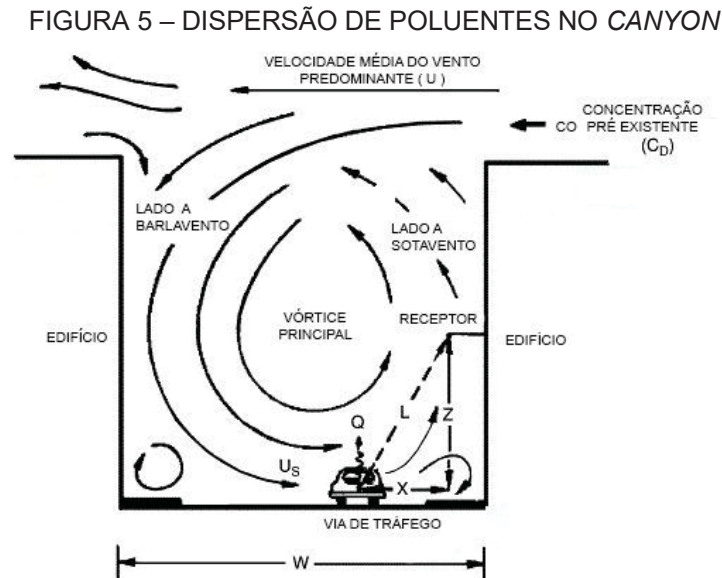
FONTE: CHEN *et al.* (2021).

A velocidade do vento varia com a altura, por exemplo, se o vento que entra na *canyon* é oblíquo ( $45^\circ$ ) ou paralelo ( $0^\circ$ ) ao eixo central da rua, então a velocidade do vento dentro desse ambiente será aproximadamente 20% a 80% menor do que a velocidade atmosférica de fundo, afetando a dispersão de poluentes (CUI *et al.*, 2019). Ao incluir árvores pode ser observado uma piora na dispersão de poluentes para a direção oblíqua do vento ( $45^\circ$ ). A pior condição para dispersão de poluentes são os ventos que entram com direção perpendicular ao eixo da rua ( $90^\circ$ ), pois ocorre o aumento da concentração de poluentes na rua, já a melhor condição é observada para os ventos paralelos ( $0^\circ$ ) devido à redução da concentração de poluentes (LIN *et al.*, 2014).

Steffens, Wang e Zhang (2012) verificaram que o aumento da velocidade do vento auxiliou em uma maior redução de partículas superiores a 50 nm, porém para partículas menores que 50 nm teve pouquíssimo efeito.

As condições sinóticas do vento acima do telhado e o fluxo de vento local dentro da cavidade do *canyon* são distintas (FIGURA 5). As concentrações do lado a sotavento tendem a ser maiores devido ao acúmulo de poluentes que são deslocados horizontalmente pelo vórtice do vento que abrange a maior área do *canyon*. Nas

pequenas cavidades podem ocorrer fenômenos de recirculação, gerando *hotspots* de baixa poluição (VARDOULAKIS *et al.*, 2003).



FONTE: Traduzido de VARDOULAKIS *et al.* (2003).

Quando o vento é paralelo ou a velocidade é baixa (menor que 2 m/s), os poluentes se acumulam próximo a fonte e as concentrações são semelhantes nos dois lados da rua (BENDER; DZIEDZIC, 2012).

Ventos sinóticos com velocidade inferior a 1,5 m/s tendem a remover o vórtice dentro do *canyon*, induzindo ao ar estagnado na rua (DEPAUL; SHEIH, 1986). É nesse momento que a turbulência mecânica gerada pelo veículo em movimento juntamente com as condições de estabilidade atmosférica pode auxiliar na dispersão dos poluentes provenientes do tráfego de veículos (LIU, 2010).

As partículas finas e grossas diferem em seus padrões de dispersão, pois, partículas finas tendem a se dispersar no ar como gases, enquanto partículas grossas são mais afetadas pela gravidade e permanecem suspensas no ar por um curto período de tempo (KUMAR *et al.*, 2008). Da mesma forma, as frações mais grossas de partículas totais em suspensão (PTS) tendem a exibir maiores gradientes de concentração comparados aos gases ou partículas finas (ARAÚJO, 2014).

Segundo Lopes (2018), para o cálculo da exposição humana em relação a concentração de poluentes atmosféricos e o tempo em um microambiente específico, como nos *street canyons*, deve-se subdividir os microambientes em sub-

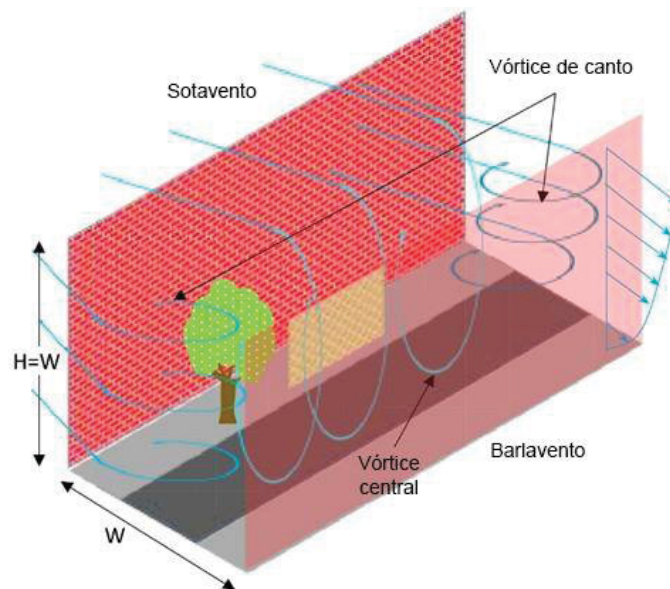


microambientes, pois nesse ambiente há pontos críticos de poluição, bem como diferentes zonas de respiração, como os residentes, ciclistas, motoristas e pedestres.

Os vórtices formados em *canyons* com a presença de vegetação auxiliam na redução das concentrações de poluentes, por meio da diluição. O fluxo de vento no entorno da vegetação depende da localização desta no *canyon*, da interação com os vórtices e das condições meteorológicas (TOMSON *et al.*, 2021).

A FIGURA 6 apresenta um exemplo da interação dos vórtices em um *canyon* com um tipo de vegetação (uma árvore).

FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS VÓRTICES EM UM CANYON COM A VEGETAÇÃO



FONTE: TOMSON *et al.* (2021).

### 2.2.3 Influência da vegetação na dispersão de poluentes

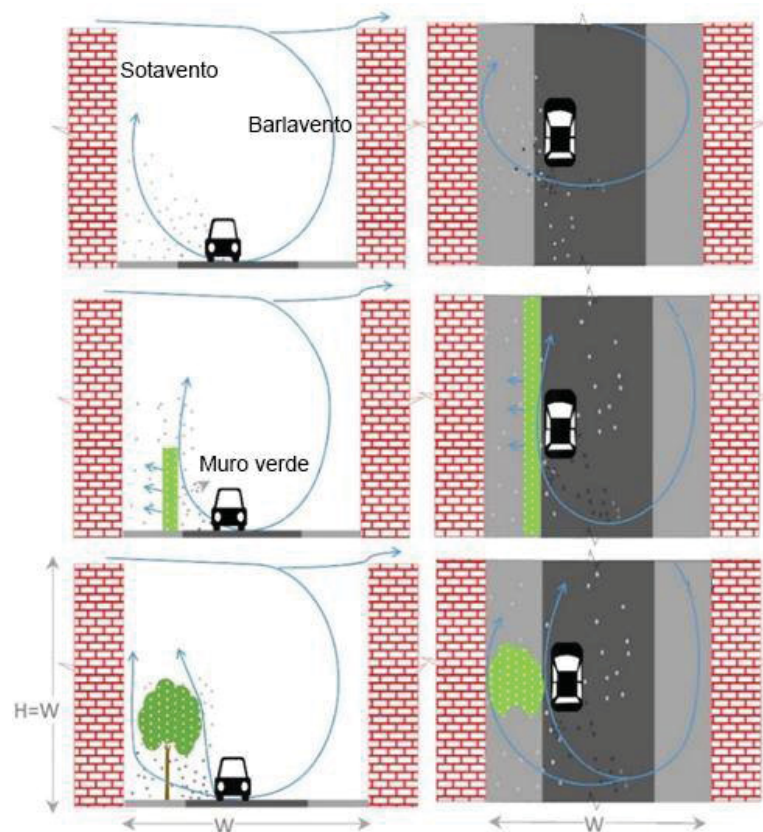
Em áreas urbanas, as árvores representam uma função importante, seja na botânica, estética ou no valor ambiental. A vegetação influencia na qualidade do ambiente urbano, como o conforto térmico, controle de temperatura, filtragem e reciclagem de poluentes e abrigo de fauna (BUCCOLIERI *et al.*, 2009). A inclusão de árvores em ruas urbanas pode reduzir a poluição do ar (LIU *et al.*, 2018).

A inserção da vegetação em *canyons* forma uma zona de baixa e alta turbulência devido a interação dos vórtices de vento com a vegetação, sendo que a primeira zona (baixa turbulência) ocorre devido à redução do fluxo de vento, e a

segunda (alta turbulência) é decorrente da rápida mudança na direção do fluxo (VOS *et al.*, 2013).

A FIGURA 7 apresenta a influência da vegetação em um *canyon* urbano, onde observa-se que obstáculos, como as árvores, podem influenciar no processo de dispersão e troca de poluentes (GROMKE, 2011; TOMSON *et al.*, 2021).

FIGURA 7 – INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA DISPERSÃO DE POLUENTES EM UM CANYON URBANO



FONTE: TOMSON *et al.* (2021).

As árvores ocupam uma parte considerável da rua, podendo refletir em efeitos na ventilação natural e dispersão das emissões liberadas pelo escapamento do veículo. A quantidade significativa de árvores plantadas com copas de maior volume separa o ambiente em dois níveis: o nível inferior da rua e o topo dos edifícios (GROMKE *et al.*, 2008).

Segundo Buccolieri *et al.* (2009), a porosidade da copa, o posicionamento e a disposição das árvores são os principais fatores que afetam a concentração de poluentes atmosféricos ao nível do pedestre em *street canyons*. Ries e Eichhorn (2001), descobriram que as características das árvores como o diâmetro,

permeabilidade e altura da copa, além da variação do espaçamento das árvores resultam em diferentes valores no campo de fluxo e concentração. É a partir da variação desses parâmetros que alguns requisitos de planejamento urbano da cidade podem ser atendidos, como as árvores ideais para garantir uma melhor qualidade do ar e conforto do pedestre.

O maior espaçamento entre as árvores resulta em menores concentrações de poluentes dentro do *canyon*, pois influencia em uma melhor ventilação natural que entra no *canyon* e remove o ar poluído. Em simulações com copas esféricas impermeáveis de 15 m de diâmetro e aumento do espaçamento entre as árvores de 15 m para 20 m, observou-se uma redução na concentração da parede A de 25,8% com tráfego parado e 9,4% com tráfego bidirecional, além de uma redução ainda maior nas extremidades do *canyon* (GROMKE; RUCK, 2007).

Em relação a concentração de poluentes atmosféricos no nível do pedestre (até 2 m acima do solo), a vegetação tem um efeito de obstrução do vento levando a diminuição da ventilação e dispersão de poluentes (BUCCOLIERI *et al.*, 2009). De acordo com Langner *et al.* (2011), a vegetação presente em *canyons* urbanos possui uma grande capacidade de filtrar MP<sub>10</sub> comparado a outras superfícies e regiões urbanas.

Na simulação de um ambiente com árvores de copas esféricas impermeáveis de 9 m de diâmetro, altura de tronco de 4,5 m e dispostas em um canteiro no centro do *canyon* com tráfego parado, a uma distância de 15 m uma da outra, observou-se aumento nas concentrações das extremidades do *canyon* devido ao vão entre as copas das árvores e as paredes que usam esse espaço livre para formar vários vórtices de *canyon*, os quais não influenciam no nível da concentração do centro da parede A. Na parede B, percebeu-se um decréscimo da concentração no centro devido a mistura do ar no topo do telhado que dilui as concentrações. Observou-se também um acréscimo nos cantos ocasionado pelas árvores da extremidade, que são como obstáculos que dificultam o fluxo lateral dos redemoinhos que entram no *canyon* (GROMKE; RUCK, 2007). Adicionando o tráfego de 40 km/h, nas duas direções, verificou-se na parede A um pequeno aumento das concentrações próximas das extremidades do *canyon* e em toda a extensão da parede B, indicando que as árvores impediram a remoção dos poluentes.

A presença de árvores em *street canyons* resulta em menores velocidades de fluxo dentro do *canyon*, além de alterar a troca de ar com os cantos próximos do

telhado e nas extremidades do *canyon*. Assim, as emissões do tráfego não são devidamente dispersas e as concentrações no fluxo ascendente da parede A de sotavento são mais altas. As copas das árvores impedem parcialmente os redemoinhos de canto e diminuem a troca de ar lateral, aumentando as concentrações na parede A (GROMKE, 2011).

Na parede A de sotavento as concentrações de poluentes do tráfego foram mais altas, conforme a diminuição da permeabilidade da copa (frações de volume dos poros) que é resultante do aumento do coeficiente de perda de pressão ( $\lambda$ ). Já, na parede B de barlavento as concentrações decresceram com a diminuição da permeabilidade da copa (GROMKE, 2011).

### 2.3 MODELOS DE DISPERSÃO

Existem modelos para estimativa das emissões do tráfego rodoviário, que são baseados na velocidade média dos veículos (SUN *et al.*, 2017). Modelos simulados em microescala oferecem uma estimativa eficiente para representação do tráfego de veículos, levando em consideração diferentes velocidades e acelerações dos veículos (WANG *et al.*, 2018).

Os métodos de pesquisas mais usuais para avaliar a influência de edifícios e da arborização das ruas em relação a dispersão de poluentes atmosféricos incluem experimentos em túneis de vento, simulações numéricas e medições em campo (ZHANG *et al.*, 2015).

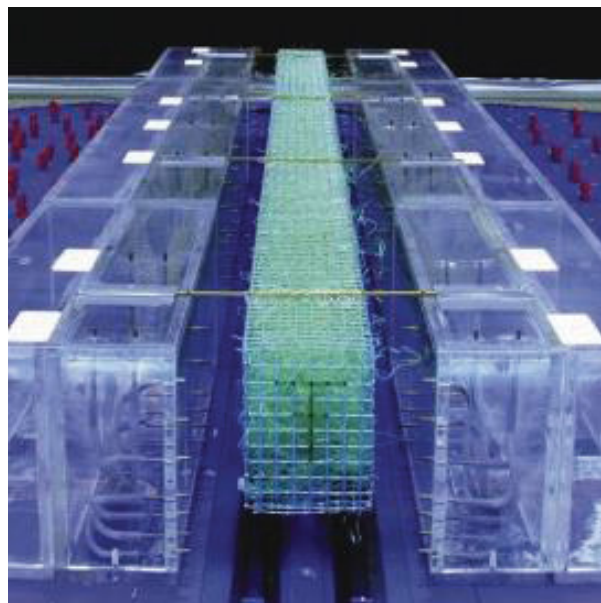
Os modelos orientados para a fonte fazem estimativas de emissão e dados meteorológicos para prever as concentrações de poluentes em diferentes locais na beira da estrada. Alguns exemplos são: modelo de pluma gaussiana, Caline<sub>4</sub>, TNO e CAR, STREET, CPBM, OSPM e AEOLIUS (GUALTIERI, 2010).

Os modelos que se baseiam na análise detalhada do poluente coletado em um ou mais locais de monitoramento são chamados de orientados para o receptor. No caso do MP que possui várias espécies químicas, a partir da sua composição podem ser feitas inferências de suas fontes. O modelo de receptor físico restrito (CPRM) é utilizado para testar as previsões realizadas por modelos orientados para a fonte, assim como a precisão das estimativas de emissão utilizadas (WÄHLIN *et al.*, 2001).

Buccolieri *et al.* (2009) utilizaram o *software* FLUENT para inserir condições de meio poroso nas simulações, sendo assim para modelagem das copas das árvores foi incluída a porosidade nos cálculos por meio do coeficiente de perda de pressão aplicado nas células da malha que foram ocupadas pelas copas das árvores. Foi utilizado o modelo de tensão de Reynolds (RSM) que definiu uma região como porosa dentro do domínio computacional, dessa forma foi utilizada uma velocidade superficial dentro desse meio de acordo com a taxa do fluxo volumétrico para que ocorra a continuidade do fluxo de massa através dos poros. As equações padrão de transporte para a turbulência no meio poroso foram calculadas pelo *solver* disponível na ferramenta.

Gromke (2011) realizou experimentos de túnel de vento para investigar a dispersão de poluentes em *street canyons* com árvores, para tanto, foi utilizada uma grade com o comprimento do *canyon* e células de tamanhos iguais que foram preenchidas com material sintético do tipo de fibra/filamento para representar as árvores (FIGURA 8).

FIGURA 8 – MODELO DE TÚNEL DE VENTO



FONTE: GROMKE (2011).

Devido aos troncos das árvores apresentarem proporção menor que a copa a sua influência no fluxo foi insignificante, por isso não foram modelados. Foram reproduzidas simulações reais de velocidade do vento, turbulência e entrada de

concentração para realizar as medições desses parâmetros em 90 pontos ao longo do *canyon*.

A configuração da modelagem possibilita testes com diferentes densidades de povoamento ( $n$ ) que é entendida como a quantidade de árvores por unidade de comprimento que pode ser obtida preenchendo cada enésima célula, além de diferentes porosidades das copas ( $P_{vol}$ ) bastando preencher essas células com massas definidas do material de enchimento. No estudo analisado, foi utilizada a densidade máxima de povoamento igual a 1 e porosidade da copa, típica de árvores decíduas, com frações de volume de poro de 97,5% e 96,0% (GROMKE, 2011). Dessa maneira, as árvores apresentaram altas e baixas densidades de povoamento, possibilitando a interferência das copas de árvores vizinhas (BUCCOLIERI *et al.*, 2009).

## 2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

### 2.4.1 Modelagem da dispersão de poluentes por CFD

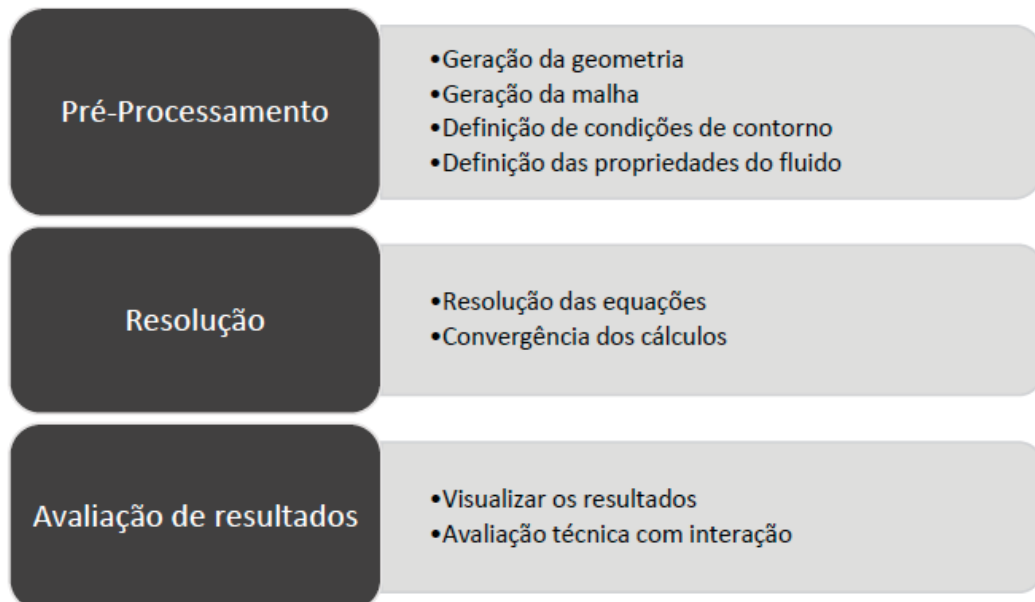
A busca por resultados mais adequados e representativos para os experimentos levam a modelagem CFD, a qual é uma ótima opção para refinar e aprimorar os resultados e compará-los com modelos físicos tradicionais. Existem no mercado vários *softwares* de código aberto ou fechado, pagos ou gratuitos, com múltiplas opções para o usuário avaliar os benefícios de cada ferramenta e escolher qual utilizar. Para realizar simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) há várias ferramentas disponíveis, como: ANSYS CFX, FLUENT, NUMECA, OpenFOAM, entre outros (COSTA JUNIOR, 2017).

A fluidodinâmica computacional descreve a análise de sistemas que envolvem fluxo de fluido, transferência de calor e seus fenômenos associados utilizando métodos numéricos de um *software* específico. A modelagem CFD tem a capacidade de analisar paredes com formas complexas (BUCCOLIERI *et al.*, 2009) e outras condições de contorno por meio de grades flexíveis com escala fina. Também incluem opções de turbulência avançada, adequadas para analisar a dispersão de poluentes em pequena escala.

Segundo Vardoulakis *et al.* (2003), os algoritmos numéricos estruturam códigos CFD para resolução de problemas de fluxo de fluido. Os pacotes CFD que possuem interfaces de entrada e saída, contam com três elementos principais (FIGURA 9):

- i. Pré-processamento: nessa etapa são inseridos os parâmetros do problema para gerar a grade do domínio computacional, indicar os fenômenos (físico e químico) para tratamento, estabelecer as propriedades do fluido e especificar as condições de contorno;
- ii. Solucionador/resolução: as variáveis de fluxo desconhecidas são aproximadas numericamente e as equações de fluxo são discretizadas a partir das aproximações e como resultado o sistema das equações algébricas é resolvido;
- iii. Pós-processamento/avaliação de resultados: o resultado é exibido na grade e geometria do domínio, sendo possível realizar a avaliação dos resultados obtidos.

FIGURA 9 – ELEMENTOS DO PROCESSO CFD



FONTE: COSTA JUNIOR (2019).

A modelagem CFD baseia-se nas equações de dispersão e na solução numérica do fluxo de fluido. Os modelos de turbulência mais utilizados são

classificados em dois tipos: o modelo clássico baseado nas equações de fluxo de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) e o modelo *Large Eddy Simulation* (LES). Adiciona-se também as técnicas de solução numérica, sendo o método de volume finito o mais estabelecido e validado (VARDOULAKIS *et al.*, 2003).

O modelo clássico e recorrido frequentemente para representar a dispersão de poluentes com a vegetação considera as equações de RANS, as quais são utilizadas para o cálculo do fluxo do vento e ainda pode ser inserido um modelo para considerar o efeito de turbulência (JEANJEAN *et al.*, 2017; LEELOSSY *et al.*, 2014; FORTUNA, 2012). O modelo LES representa melhor a turbulência, entretanto ainda há muitas dificuldades para especificar as condições de entrada e de contorno (STRAUSS *et al.*, 2019).

De modo geral, o campo de velocidade pode ser calculado utilizando as equações de Navier-Stokes, porém para escoamentos incompressíveis é um sistema complexo devido ao forte acoplamento entre pressão e velocidade, além de que a pressão não é uma variável primária nas equações de momento ou continuidade (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

As equações de Navier-Stokes em termos da equação de momento são apresentadas a seguir, sendo em (1) a equação de continuidade e (2) a equação do momento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho \mathbf{v}] + \nabla \cdot \{ \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \} = -\nabla p + \nabla \cdot \{ \mu [(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v})^T] \} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é a densidade,  $p$  é a pressão,  $\mathbf{v}$  é o campo de velocidade,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade molecular e  $\mathbf{f}_b$  são as forças de corpo.

Um dos fatores que influenciam a permeabilidade do vento é a textura do meio poroso, como o arranjo, a forma, a distribuição do tamanho dos poros e a rugosidade das paredes, assim como a sua orientação para o fluxo. O coeficiente de rugosidade é utilizado para cada superfície do domínio de modo a considerar o relevo da rua e dos edifícios, como varandas, vegetação e carros estacionados. A permeabilidade do meio poroso é obtida pelo coeficiente de perda de pressão ( $\lambda$ ), o qual é determinado em fluxos de convecção forçada. As medições realizadas por Gromke (2011)



resultaram em  $\lambda = 80 \text{ m}^{-1}$  e  $\lambda = 200 \text{ m}^{-1}$  para alta ( $P_{\text{vol}} = 97,5\%$ ) e baixa ( $P_{\text{vol}} = 96,0\%$ ) porosidade, já em escala real ( $M = 1:150$ ) os valores ficam em  $\lambda_{\text{fs}} = 0,53 \text{ m}^{-1}$  e  $\lambda_{\text{fs}} = 1,33 \text{ m}^{-1}$ .

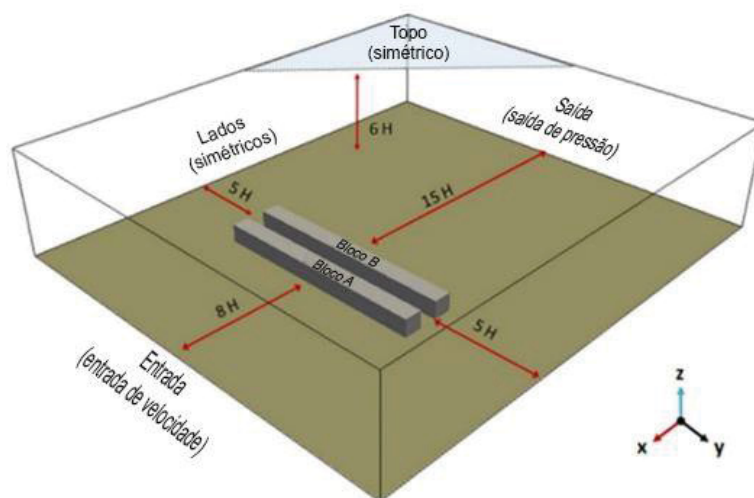
#### 2.4.2 Geometria, domínio computacional e malha de uma simulação

A geometria representa um objeto de estudo ou o domínio computacional que é composto por vários objetos, podendo ser gerada em duas ou três dimensões para utilização no OpenFOAM, em razão do seu sistema de coordenadas cartesianas tridimensional (OPENCFD, 2023). Já a malha é a discretização do modelo geométrico, ou seja, é a divisão da geometria em vários volumes de controle, sendo que quanto maior for o número de volumes menor é o erro (JATOBÁ, 2016).

O domínio computacional necessita ser estendido a fim de estabilizar a entrada e saída de ar pelos limites geométricos da área, visando a correta análise da dispersão de poluentes dentro do *street canyon* (FRANKE *et al.*, 2007).

As dimensões do domínio computacional são descritas em termos de altura (H) do edifício, sugere-se que os blocos construídos para representação dos prédios estejam localizados a 8H do limite de entrada e 15H do limite de saída, além disso uma distância simétrica de 5H pode ser utilizada em ambos os lados do domínio e a altura do topo pode ser de 6H (FIGURA 10).

FIGURA 10 – DOMÍNIO COMPUTACIONAL



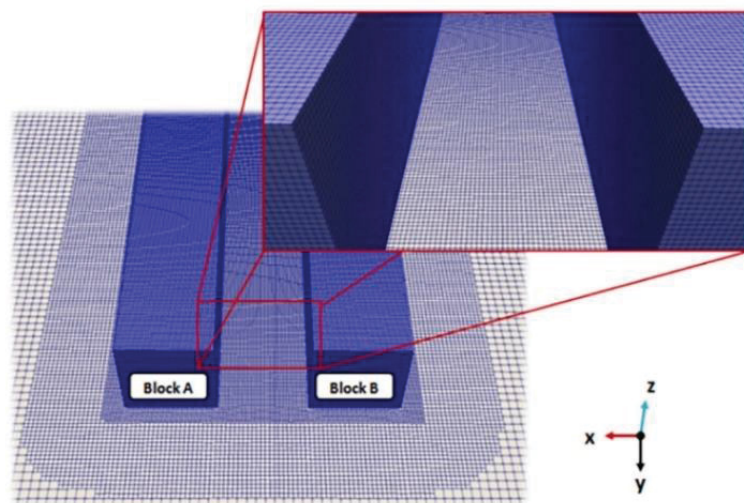
FONTE: Zavala-Reyes *et al.* (2019).

A discretização do espaço em simulações de dispersão de poluentes em *street canyons* não é uniforme, pois é necessário que a resolução da malha seja maior nas paredes do *canyon* e na rua, onde há maior variação de velocidade do ar e, conseqüentemente, maior concentração de poluentes (ZAVALA-REYES *et al.*, 2019).

No entanto, é importante ressaltar que o refinamento da malha aumenta o tempo de processamento necessário para a simulação, o que pode ser um fator limitante em aplicações práticas (ARROYO; LAHR; CHRISTOFORO, 2022). Por isso, é fundamental encontrar um equilíbrio entre o tempo de processamento e a qualidade dos resultados obtidos.

A FIGURA 11 apresenta a representação de uma malha mais refinada na região do *canyon* e menos refinada no restante do domínio computacional, dessa forma o tempo de processamento não será comprometido e os resultados na região de interesse serão mais exatos.

FIGURA 11 – REFINAMENTO DA MALHA NA REGIÃO DE INTERESSE



FONTE: Zavala-Reyes *et al.* (2019).

Existem diversas formas e *softwares* para criar uma geometria, como o *software* CAD que representa um projeto e desenho feito com o auxílio de um computador substituindo o processo manual (AUTODESK, 2021), cita-se também o *software* OpenSCAD que é capaz de criar modelos 3D sólidos, porém a malha gerada aprese Jeanjean *et al.* (2017) e Buccolieri *et al.* (2018) obtiveram resultados satisfatórios na modelagem de poluentes atmosféricos utilizando o OpenFOAM. A aplicabilidade da ferramenta já foi testada e validada por esses e outros autores,

porém antes de começar o processo de avaliação de comparação entre modelos físicos e numéricos, é necessário calibrar e validar o novo modelo numérico criado.

Também há muitos pré-processadores CFD que podem criar uma geometria, por exemplo, o *blockMeshDict*, que é uma das ferramentas do OpenFOAM, e o *software* Salome que é *open source*, ou seja, um *software* que tem seu código fonte aberto (disponibilizado e licenciado para qualquer usuário e finalidade) e gratuito (HOLZINGER, 2018).

O *software* Salome possui uma plataforma genérica de pré e pós-processamento da simulação numérica e uma interface gráfica de fácil utilização possibilitando a criação de uma geometria interativa e do domínio computacional, além de diversos utilitários para geração de malha em 1, 2 ou 3 dimensões (OPEN CASCADE, 2021).

A partir da criação da geometria, do domínio computacional e da malha, essa pode ser exportada no formato UNV sendo convertida usando o utilitário *ideasUnvToFoam* para abrir no OpenFOAM (HOLZINGER, 2018).

#### 2.4.3 Uso do OpenFOAM para simulação de modelos em CFD

O *Open Source Field Operation and Manipulation* (OpenFOAM) é uma biblioteca redigida em linguagem C++ para criar executáveis (aplicativos), constituindo-se em um conjunto de ferramentas de CFD (OPENCFD, 2023). O *software* pode ser acessado a partir de uma linha de comando (terminal) no sistema operacional *Linux* ou pelo *Windows* utilizando, por exemplo, o Ubuntu que é um terminal construído para executar aplicativos do sistema *Linux* no *Windows* (CANONICAL, 2023).

O OpenFOAM possui geradores de malhas, *solvers* (solucionadores) e aplicativos utilitários de pós-processamento (SIEBERT e SALAZAR, 2021). A versão 7 consiste em mais de 80 solucionadores e 170 aplicativos utilitários que resolvem desde fluxos de fluidos complexos envolvendo reações químicas, turbulência e transferência de calor até a dinâmica sólida e eletromagnética.

Este *software* utiliza equações de fluidodinâmica discretizadas para calcular as grandezas físicas desejadas. Os solucionadores disponibilizados possuem equações predeterminadas para resolver tipos específicos de problemas, além da possibilidade

de escolher o melhor solucionador que se encaixa no problema e determinar as condições de contorno do problema (GREENSHIELDS, 2019).

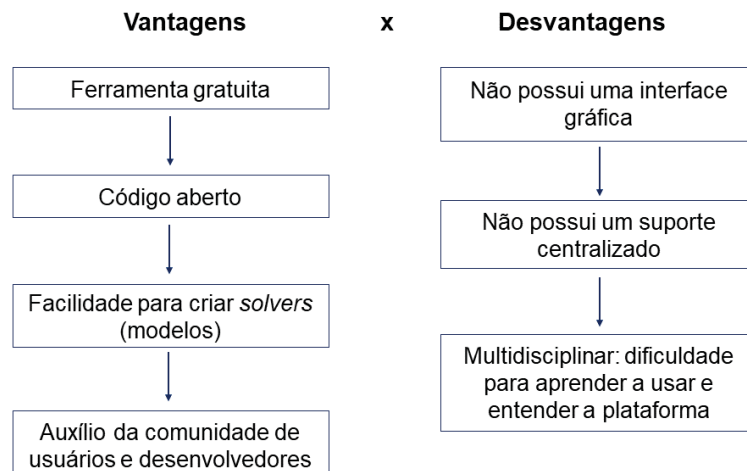
A biblioteca do OpenFOAM é composta por vários modelos de fluxos compressíveis e incompressíveis, bidimensionais e tridimensionais. Podem ser utilizadas diversas geometrias, tipos de escoamento e modelos de turbulência (k- $\omega$ , k- $\epsilon$  e k- $\omega$  SST).

A FIGURA 12 mostra a sequência de trabalho no *software* e na FIGURA 13 é possível visualizar algumas das suas vantagens e desvantagens.



FONTE: Adaptado de COSTA JUNIOR (2019).

**FIGURA 13 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DO OPENFOAM COM RELAÇÃO AOS DEMAIS SOFTWARES EXISTENTES**

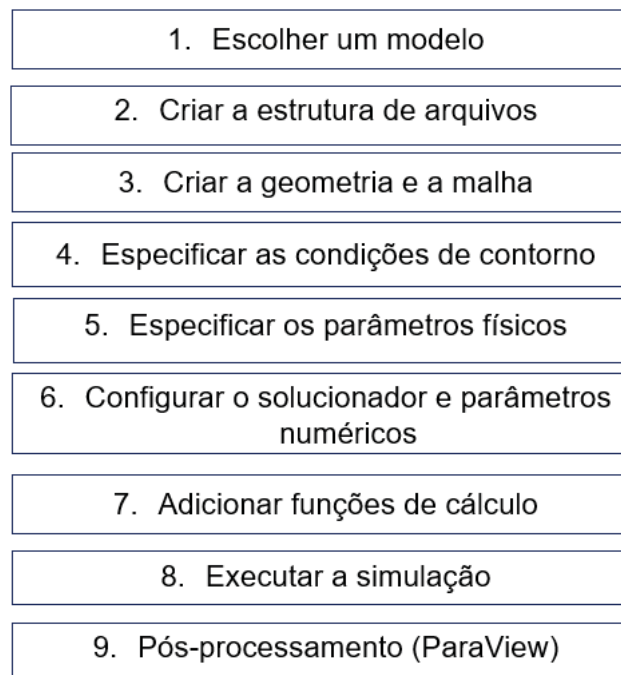


FONTE: Adaptado de JATOBÁ (2016) e SIEBERT e SALAZAR (2021).

A partir da inserção das variáveis no modelo é preciso fazer testes com variações entre os itens para aprimorar os resultados obtidos (COSTA JUNIOR, 2019) e validar os resultados comparando com valores reais medidos *in loco*.

Para configurar um caso no OpenFOAM são utilizados vários arquivos de texto (códigos) distribuídos em três diretórios: *system*, *constant* e 0 (tempo inicial). A FIGURA 14 apresenta as etapas essenciais para a configuração, execução e pós-processamento de uma simulação no OpenFOAM.

FIGURA 14 – ETAPAS PARA CRIAR UM CASO NO OPENFOAM



Fonte: Adaptado de Siebert e Salazar (2021).

Na etapa 1, é necessário selecionar um modelo (solucionador) adequado no OpenFOAM, considerando a natureza do problema e consultando a documentação para entender as capacidades de cada modelo. É importante explorar os solucionadores do tipo padrão e especializados, buscar estudos de caso e exemplos relacionados, realizar experimentação e/ou validação, a fim de escolher o solucionador mais apropriado em termos de física, precisão numérica e eficiência computacional.

Na etapa 2, é preciso criar a estrutura de arquivos no OpenFOAM, iniciando pela cópia da estrutura padrão de arquivos do solucionador escolhido. Em seguida, é necessário editar os arquivos nos diretórios "*system*", "*constant*" e "0" para configurar

o caso corretamente. Essa estrutura de diretórios auxilia na organização dos arquivos relevantes para cada parte do caso, facilitando a gestão do projeto.

Na etapa 3, é fundamental criar a geometria do problema e a malha apropriada ao caso. Para isso, pode-se utilizar as ferramentas embutidas no OpenFOAM, como o *blockMesh* ou *SnappyHexMesh*, ou recorrer a conversores externos, como Blender, FreeCAD, Salome, entre outros.

Na etapa 4, é essencial especificar as condições de contorno no OpenFOAM. Isso envolve a identificação dos arquivos correspondentes às condições de contorno no diretório "0" do caso e a edição desses arquivos para definir as condições adequadas, como velocidade, pressão ou outras variáveis relevantes para o problema em questão. Além disso, é importante considerar a configuração do campo de contorno, como o gradiente de velocidade inicial, quando aplicável.

Na etapa 5, é necessário especificar os parâmetros físicos no OpenFOAM. Identifique os arquivos correspondentes no diretório "*constant*" do seu caso e edite-os para definir os valores adequados dos parâmetros físicos, como viscosidade, densidade e difusividade térmica.

Na etapa 6, configure o solucionador e os parâmetros numéricos no OpenFOAM. Edite os arquivos de configuração relevantes, como *controlDict*, *fvSchemes* e *fvSolution*, localizados no diretório "*system*" do caso. No arquivo *controlDict*, defina as configurações do solucionador, como tempo de simulação e métodos numéricos. No arquivo *fvSchemes*, especifique os esquemas numéricos para derivadas espaciais e temporais. No arquivo *fvSolution*, ajuste os parâmetros numéricos específicos do solucionador, como tolerância de convergência e métodos de relaxamento.

Na etapa 7, adicione funções de cálculo automáticas ou personalizadas. Identifique o arquivo apropriado, como U para velocidade ou p para pressão, e edite-o. Utilize as funções de cálculo automáticas fornecidas pelo OpenFOAM, como *uniform*, *zero*, *fixedValue* e *spline*, para definir os campos automaticamente. Especifique os parâmetros adequados para cada função e valide o campo calculado para garantir que atenda às expectativas.

Na etapa 8, execute a simulação no OpenFOAM. Certifique-se de que o caso esteja configurado corretamente, incluindo a estrutura de arquivos, as condições de contorno, os parâmetros físicos, o solucionador e os parâmetros numéricos. No terminal, navegue até o diretório do caso e execute o solucionador apropriado,

monitorando o progresso e verificando possíveis mensagens de erro ou avisos. Ao finalizar, verifique os resultados nos diretórios de saída do caso.

Na etapa 9, realize o pós-processamento dos resultados utilizando o ParaView. Abra o ParaView, carregue o caso do OpenFOAM e selecione os campos desejados. Configure a visualização dos campos, ajustando cores, escalas e planos de visualização, e aplique filtros disponíveis para análise e processamento dos dados. Para melhorar a visualização e análise, utilize isolinhas, cortes transversais e *plots* temporais. Se desejar, exporte imagens ou animações dos resultados.

O ParaView é um *software* de código aberto amplamente utilizado para análise e visualização de dados científicos em diversas áreas, desenvolvido para lidar com conjuntos de dados de grande magnitude e oferece recursos avançados, incluindo visualização remota e processamento paralelo (AYACHIT, 2015). Por meio de representações visuais interativas, o ParaView possibilita a exploração e análise de informações complexas, facilitando a compreensão de padrões e perspectivas contidos nos conjuntos de dados (KITWARE, 2023).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A análise de dispersão de CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> em cenários com e sem árvores foi realizada a partir da execução de simulações em um *street canyon* hipotético utilizando o *software* OpenFOAM, versão 7 (OPENFOAM, 2019), considerando dados hipotéticos e reais de emissões veiculares.

#### 3.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO E APLICAÇÃO NO OPENFOAM

O comportamento dos poluentes na atmosfera foi analisado por meio de um modelo que leva em consideração a equação da continuidade (conservação da massa), a equação de Navier-Stokes (conservação do *momentum*) e a equação geral da conservação (convecção-difusão) para o transporte de poluentes. No item 2.4.1, as duas primeiras equações (equação 1 e 2) foram apresentadas, enquanto a equação subsequente é descrita a seguir (equação 4).

No OpenFOAM foi utilizado algoritmo SIMPLE (método semi-implícito para equações vinculadas à pressão) que utiliza as equações de Navier-Stokes em termos da equação de momento.

A vegetação influencia na turbulência e afeta a dissipação e a dispersão (ZENG *et al.*, 2020). Foi adicionado um termo para representar a influência da presença de árvores onde foi atribuído o efeito da zona porosa no fluxo do ar, conforme abordado por Jeanjean *et al.* (2017), utilizando-se a equação (3) que é calculada pelo solucionador *powerLaw* para determinar a dissipação.

$$S = -\lambda(\rho|U|U) \quad (3)$$

Sendo  $S$  a dissipação,  $\rho$  a densidade do fluido,  $\lambda$  o coeficiente de perda de pressão induzido pelas árvores e  $U$  a velocidade do fluido.

Foi utilizada a forma final da equação geral de conservação (convecção-difusão) para o transporte de uma partícula ( $\phi$ ), a qual é expressa conforme indicado na equação 4 (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\phi\nabla\phi) + \mathcal{Q}\phi \quad (4)$$



Sendo  $\rho$  a densidade do fluido,  $\mathbf{v}$  é o campo de velocidade,  $\Gamma^\phi$  denota o coeficiente de difusão e  $Q^\phi$  denota a origem da partícula. Representando em ordem: o termo instável, termo de convecção, termo de difusão e termo de origem.

Para o caso do escoamento incompressível, a equação para o cálculo da dispersão foi simplificada para ser incluída no modelo, conforme indicado na equação 5.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(U_i C) - \nabla^2(DC) = 0 \quad (5)$$

Onde  $C$  é a concentração do poluente e  $D$  é o coeficiente de difusão do poluente.

Para calcular o efeito de deposição de MP foi utilizada a equação 6, conforme utilizado por Jeanjean, Monks e Leigh (2016).

$$\Delta C(t) = C(t - 1) \times LAD \times Vd \quad (6)$$

Onde  $\Delta C(t)$  é a mudança na concentração de partículas via deposição,  $C(t - 1)$  é a concentração de partículas,  $LAD$  é a densidade da área foliar e  $Vd$  é a velocidade de deposição.

No modelo  $k$ - $\varepsilon$ , a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação de energia turbulenta ( $\varepsilon$ ) são calculadas usando a equação 7 e 8, respectivamente, propostas por Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \varepsilon) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\varepsilon} \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

Onde

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad \mu_{eff,\varepsilon} = \mu + \frac{\mu_t}{\mu_\varepsilon} \quad (9)$$

Sendo  $P_k$  a produção de energia turbulenta,  $\mu$  o coeficiente de viscosidade molecular e para as constantes do modelo Moukalled, Mangani e Darwish (2016) atribuíram os seguintes valores:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

### 3.2.1 Condições de contorno

Para especificar as condições de contorno podem ser utilizadas as equações do modelo RANS para o cálculo do fluxo do vento (equação 10):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

Sendo  $U_i$  a velocidade do vento, a qual é decomposta em dois termos de acordo com a equação 11:

$$U_i = \bar{U}_i + U_i' \quad (11)$$

Onde  $\bar{U}_i$  é o valor médio da velocidade do vento e  $U_i'$  a sua flutuação.

Sabendo que o OpenFOAM emprega modelos específicos a partir de equações predeterminadas, para incluir o efeito da turbulência foi utilizado o modelo  $k$ - $\varepsilon$  e o solucionador *porousSimpleFoam* que utiliza as equações (12) e (13) para calcular a energia cinética de turbulência ( $k$ ) e sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) nas diferentes zonas.

$$k = \frac{1}{2} \overline{U_i' U_i'} \quad (12)$$

$$\varepsilon = \frac{C_U^{0,75} k^{1,5}}{l} \quad (13)$$

Onde  $C_U$  é uma constante do modelo e  $l$  é a escala de comprimento de turbulência. A equação 13 foi adotada para regiões com seção retangular (GREENSHIELDS, 2019), pois depende diretamente da geometria do problema, que no caso de avenidas podem ser consideradas como seções retangulares.

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  adotado considera o escoamento incompressível, isotérmico e turbulento para estudo da dispersão de  $\text{CO}_2$ . Esse modelo também foi utilizado para o  $\text{MP}_{2,5}$ , e foi incluído o efeito de deposição do poluente, conforme estipulado na equação (6).

Ressalta-se que o modelo  $k$ - $\varepsilon$  foi validado a partir de ensaios em túneis vento, (GROMKE; RUCK, 2012), o qual apresentou um desempenho satisfatório considerando a presença da vegetação (VRANCKX *et al.*, 2015). Ainda, esse modelo foi utilizado no OpenFOAM por Jeanjean *et al.* (2017) para simulações com  $\text{NO}_x$  e  $\text{MP}_{2,5}$ .

Além das equações do modelo foram adicionadas as condições de contorno para solucionar o modelo numericamente, conforme apresentado no QUADRO 5.

QUADRO 5 – CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS NO OPENFOAM

Variável	Parâmetro do OpenFOAM
$U_i$ - velocidade do vento	<i>fixedValue</i> <i>noSlip</i> <i>zeroGradient</i>
$p$ - pressão cinemática	<i>fixedValue</i> <i>zeroGradient</i>
$C$ - concentração do poluente	<i>fixedValue</i> <i>advective</i>
$\nu$ - viscosidade turbulenta	<i>nutkWallFunction</i>
$k$ - energia cinética de turbulência	<i>kqRWallFunction</i>
$\varepsilon$ - taxa de dissipação	<i>epsilonWallFunction</i>

FONTE: A autora (2023).

O método numérico utilizado para a resolução das equações do modelo proposto para estudo da dispersão de  $\text{CO}_2$  e  $\text{MP}_{2,5}$  na rua hipotética, se baseou na aproximação numérica das variáveis de escoamento desconhecidas e com a discretização das equações na geometria para que o OpenFOAM resolvesse o sistema de equações do modelo. O *software* utiliza o processo de solução iterativa para determinar o grau de convergência do campo de solução.

Foi utilizado no OpenFOAM o arquivo *fvSchemes* para definição dos esquemas numéricos de discretização utilizados na solução do modelo, como as derivadas das equações. O arquivo *fvSolution* foi utilizado para controlar a solução

das equações de transporte, definindo tolerâncias, resíduos e algoritmos para o solucionador.

### 3.2 TESTES DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO DE DISPERSÃO ADOTADO

Para testar o modelo de dispersão estabelecido foram realizados ensaios preliminares utilizando como poluente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), considerando os seguintes cenários: 1) com e sem árvores; 2) velocidade inicial do vento de 1 m/s e 2 m/s; 3) direção do vento paralelo ( $0^\circ$ ), oblíquo ( $45^\circ$ ) e perpendicular ( $90^\circ$ ) ao eixo principal da rua. Ressalta-se que nessas simulações o modelo não considerou o efeito de deposição do poluente, devido à ausência dessas características em gases, esta consideração também foi adotada por Guilhotti (2022). A absorção do poluente à vegetação também não foi considerada.

#### 3.2.2.1 Criação da geometria, domínio computacional e malha

A geometria adotada neste estudo foi baseada na pesquisa de Gromke e Ruck (2012) e criada utilizando o *software* Salome, versão 9.8.0 (SALOME, 2021), devido às suas vantagens (OPEN CASCADE, 2021).

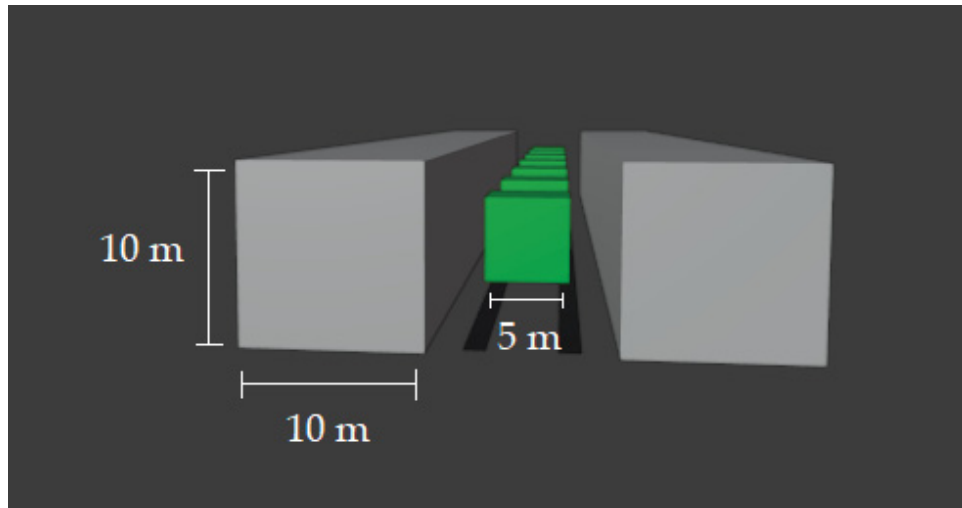
Foi adotada como referência as dimensões de um modelo de túnel de vento para representar uma rua hipotética em um centro urbano, que consistia em dois edifícios de 100 m de comprimento (L) e 10 m de largura (W) e altura (H), separados por uma distância de 10 m, representando a região da rua e da calçada, a qual foi designada como local de emissão de poluentes. Considerando a relação  $H/W = 1$ , o *canyon* urbano avaliado foi classificado como regular (YAZID et al., 2014).

Na geometria supracitada, foram designadas duas áreas distintas para as células: uma zona porosa destinada às árvores e outra sem porosidade para a rua e os edifícios. No espaço reservado para a rua, foi estabelecido um canteiro central localizado a 5 m das paredes dos edifícios, onde foram plantadas 7 árvores. Essas árvores foram representadas por blocos retangulares de 5 m de comprimento (L), 5 m de largura (W) e 5 m de altura (H), com um espaçamento de 10 m entre eles. A altura da copa das árvores começou em 3 m, enquanto a região do tronco foi desconsiderada na simulação, pois, de acordo com GROMKE (2011), sua proporção em relação à copa é insignificante.

Ao longo da região da rua foram inseridas duas faixas para representar as fontes de emissão de poluentes, as quais foram posicionadas - como proposto por KAMMER (2018) - na altura de 0,5 m, ou seja, um pouco acima da altura do escapamento dos veículos.

A FIGURA 15 apresenta a geometria do *street canyon* hipotético criado com base nas dimensões citadas.

FIGURA 15 – GEOMETRIA DA RUA HIPOTÉTICA



FONTE: A autora (2023).

Foram seguidas as diretrizes propostas por Franke *et al.* (2007) com as melhores técnicas para construção do domínio computacional em ambiente urbano. O domínio foi construído em termos de altura do edifício mais alto ( $H = 10$  m), ou seja, os prédios foram localizados a 80 m do limite de entrada e 150 m do limite de saída e foi adotada uma distância simétrica de 50 m em ambos os lados do domínio e a altura do topo de 60 m.

Após a criação da geometria e do domínio computacional foi necessário gerar uma malha estruturada, utilizando também o *software* Salome. A geometria foi discretizada com cerca de 708.000 células para reduzir o tempo computacional e garantir resultados precisos. Conforme Arroyo, Lahr e Christoforo (2022), a malha foi mais refinada na região da rua para realizar cálculos mais precisos e menos refinada no restante do domínio computacional para não comprometer o tempo de processamento.

### 3.2.2.2 Definição das condições iniciais

As condições iniciais são apresentadas no QUADRO 6, cabe salientar que todos os parâmetros permaneceram constantes com exceção da concentração do poluente emitido pela fonte móvel, velocidade,  $\varepsilon$  e  $k$  que foram calculados a partir dos valores iniciais.

QUADRO 6 – CONDIÇÕES INICIAIS APLICADAS NO OPENFOAM: TESTES PRELIMINARES

Variável	Valor	Unidade	Referência
$C$	1,0	kg/m <sup>3</sup>	Estimado
$U_i$	1,0 e 2,0	m/s	Estimado
$\varepsilon$	0,029	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	Greenshields (2019)
$\nu$	$1,5 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s	<i>Engineering ToolBox</i> (2003)
$k$	0,25	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Greenshields (2019)
$C_o$	0,6	-	Jeanjean <i>et al.</i> (2017)
$p$	0,1	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Estimado
$D$	$1,6 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s	<i>Engineering ToolBox</i> (2018)

FONTE: A autora (2023).

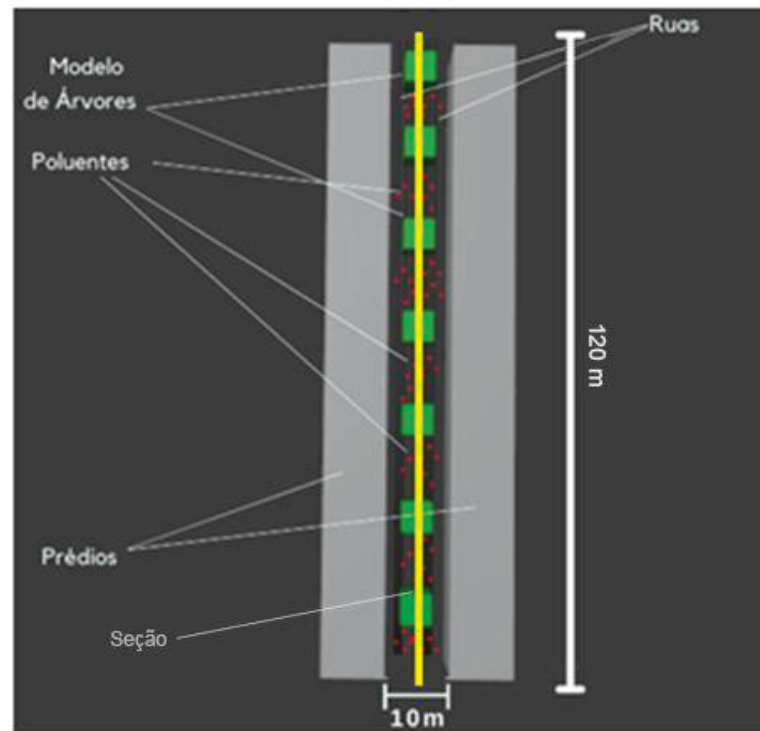
### 3.2.2.3 Pós-processamento dos resultados

O pós-processamento foi realizado no *software* ParaView, versão 5.9 (PARAVIEW, 2021), onde foi possível recortar os volumes de interesse do domínio computacional. Em cada simulação, foi feita uma seção longitudinal de 120 m de comprimento no meio da rua, ou seja, na região central do *canyon* (FIGURA 16).

Dessa forma, foi avaliada a variação da velocidade ( $U$ ) e da concentração média de CO<sub>2</sub> ( $C$ ) na região avaliada. As tabelas de resultados calculados pelo OpenFoam e geradas pelo ParaView, forneceram os valores dos parâmetros listados no QUADRO 5 para cada posição ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) na seção efetuada.

Durante a geração das figuras, a escala de velocidade foi representada em unidades de metros por segundo (m/s), enquanto a concentração foi expressa em unidades de quilogramas por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>), seguindo as convenções do Sistema Internacional de Unidades (SI). Além disso, os valores de concentração nas tabelas de resultados foram convertidos para microgramas por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>), seguindo o padrão utilizado nas legislações aplicáveis. Essa conversão foi realizada a fim de adequar os resultados às unidades de medida comumente utilizadas na avaliação e regulamentação dos poluentes.

FIGURA 16 – SEÇÃO LONGITUDINAL



FONTE: A autora (2023).

Para avaliar a influência das árvores na concentração média do poluente foi utilizada a equação 14, ou seja, para verificar se houve redução ou aumento da concentração média na presença de árvores:

$$var = \frac{C_t - C}{C} \times 100 \quad (14)$$

Onde *var* representa a redução ou aumento da concentração de poluentes,  $C_t$  é a concentração média de poluentes na presença de árvores e  $C$  é a concentração média na ausência de árvores.

### 3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO

Com o objetivo de validar o modelo proposto, foram adotadas as mesmas condições dos testes realizados nos itens 3.1 e 3.2 deste estudo. Para efeitos de comparação, foram utilizados resultados de estudos que também empregaram condições semelhantes aos testes realizados neste trabalho. No entanto, devido à

falta de informações completas na bibliografia consultada, não foi possível reproduzir exatamente as mesmas condições desses estudos.

Dessa forma, para fins de comparação, foram utilizados resultados de experimentos em túnel de vento disponibilizados pelo Laboratory of Building-and Environmental Aerodynamics (CODASC) conduzidos por Gromke e Ruck (2007, 2008 e 2012), bem como as simulações CFD realizadas por Xiong e Chen (2021). Essa abordagem permitiu avaliar a precisão e a concordância dos resultados obtidos na simulação, estabelecendo referências confiáveis para o modelo proposto.

Para validar o fluxo do ar, foram realizadas simulações utilizando CO<sub>2</sub> com direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua (90°) e duas velocidades iniciais: 1,0 m/s e 2,0 m/s.

No caso da velocidade inicial de 1,0 m/s, os resultados obtidos foram comparados com um estudo realizado por Xiong e Chen (2021). Esses pesquisadores conduziram simulações CFD no OpenFOAM, utilizando uma velocidade inicial de 0,5 m/s (considerada baixa velocidade) e a mesma direção do vento perpendicular à rua (90°).

Já para a velocidade de 2,0 m/s, os resultados foram comparados com os dados disponíveis no banco de dados da CODASC. Essa comparação foi possível porque o experimento realizado no túnel de vento adotou a mesma direção do vento, ou seja, perpendicular ao eixo principal da rua.

Para validar o campo de concentração de poluentes, foram realizados testes com uma velocidade inicial de 1,0 m/s e comparados com o banco de dados da CODASC. Essa comparação foi feita considerando três direções do vento: perpendicular, paralela e oblíqua ao eixo principal da rua. A fim de realizar uma análise comparativa precisa, as concentrações foram normalizadas utilizando a equação 15, em virtude dos ensaios disponíveis pelo banco de dados da CODASC ter utilizado o Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) como gás traçador, enquanto o presente estudo se concentrou na análise do CO<sub>2</sub>.

$$C^+ = \frac{C_m * H * U_H}{Q_I} \quad (15)$$

Onde  $C^+$  é a concentração normalizada,  $C_m$  a concentração medida,  $H$  a altura,  $U_H$  a velocidade do vento na altura  $H$  e  $Q_I$  a taxa de emissão do poluente na linha fonte.



### 3.4 SIMULAÇÕES DA DISPERSÃO DE CO<sub>2</sub> E MP<sub>2,5</sub>

Utilizando o modelo validado e calibrado, foram conduzidas simulações para CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub>, com o objetivo de investigar o efeito da presença ou ausência de árvores na concentração de poluentes. As simulações foram realizadas considerando o estado estacionário, portanto, levou-se em consideração a concentração real emitida pelo escapamento de um veículo individual, conforme descrito em pesquisas anteriores (ÁLVARES JÚNIOR; LINKE, 2002; TAVARES *et al.*, 2010) e calculado para a geometria da simulação. Dessa forma, foi possível analisar de forma mais precisa o impacto das árvores na dispersão dos poluentes estudados.

Durante as simulações também foram variados os valores iniciais de velocidade do vento (0,1 m/s, 1,0 m/s e 2 m/s) e direção do vento (paralela, 0°, e perpendicular, 90°, ao eixo principal da rua).

As condições iniciais são apresentadas no QUADRO 7, cabe salientar que todos os parâmetros permaneceram constantes com exceção da concentração, velocidade,  $\varepsilon$  e  $k$  que foram calculados a partir dos valores iniciais.

QUADRO 7 – CONDIÇÕES INICIAIS APLICADAS NO OPENFOAM: SIMULAÇÕES DE CO<sub>2</sub> E MP<sub>2,5</sub>

Variável	CO <sub>2</sub>	MP <sub>2,5</sub>	Unidade	Fonte
$C$	222,50	0,0145	kg/m <sup>3</sup>	Adaptado de Álvares Júnior e Linke (2002) e Tavares <i>et al.</i> (2010)
$U_i$	0,1; 1,0 e 2,0	0,1; 1,0 e 2,0	m/s	Estimado
$\nu$	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s	<i>Engineering ToolBox</i> (2003)
$C_o$	0,6	0,6	-	Jeanjean <i>et al.</i> (2017)
$p$	0,1	0,1	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Estimado
$D$	$1,6 \times 10^{-5}$	$1,1446 \times 10^{-11}$	m <sup>2</sup> /s	<i>Engineering ToolBox</i> (2018)

FONTE: A autora (2023).

Para realizar o pós-processamento dos resultados, utilizou-se o *software* ParaView. Esse *software* permitiu selecionar volumes de interesse no domínio computacional, o que possibilitou gerar figuras e obter resultados calculados em seções específicas. O objetivo dessa análise foi avaliar a variação da velocidade ( $U$ ) e da concentração média ( $C$ ) dos poluentes CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> na região de estudo.

Em todas as simulações foi feita uma seção longitudinal ao longo do comprimento no meio da rua, ou seja, na região central do *canyon*, com 15 m de altura

e 120 m de comprimento (FIGURA 16), para visualizar o comportamento da velocidade antes de entrar e após sair do *canyon*. Adicionalmente, foi feita uma seção no eixo transversal da simulação na altura de 1,65 m (altura média da respiração de um pedestre adulto).

Com objetivo de verificar a variação da concentração em diferentes alturas, foram obtidas as concentrações médias na seção longitudinal no meio da rua nas alturas de 1,00 m, 1,50 m, 1,65 m, 2,00 m, 3,00 m, 4,00 m e 10,00 m.

Foi avaliada a influência das árvores na concentração média do poluente em todas as simulações para  $\text{CO}_2$  e  $\text{MP}_{2,5}$ , considerando as seções efetuadas para os cenários com e sem árvores para diferentes valores iniciais de velocidade (0,1 m/s; 1,0 m/s e 2 m/s), direção do vento (paralelo ( $0^\circ$ ) e perpendicular ( $90^\circ$ ) ao eixo principal da rua) e altura.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 TESTES PRELIMINARES PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO MODELO ADOTADO

No *software* OpenFOAM, foram realizadas simulações iniciais em uma rua hipotética (FIGURA 15, Item 3.2.2.1) para testar o modelo de dispersão estabelecido. Os resultados, apresentados na TABELA 1, incluem o campo de velocidade (vetores nos eixos x, y e z) e a concentração média de CO<sub>2</sub> para diferentes valores iniciais de velocidade e direção do vento, bem como a influência da presença ou ausência de árvores.

TABELA 1 – RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES PARA CO<sub>2</sub>: SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA

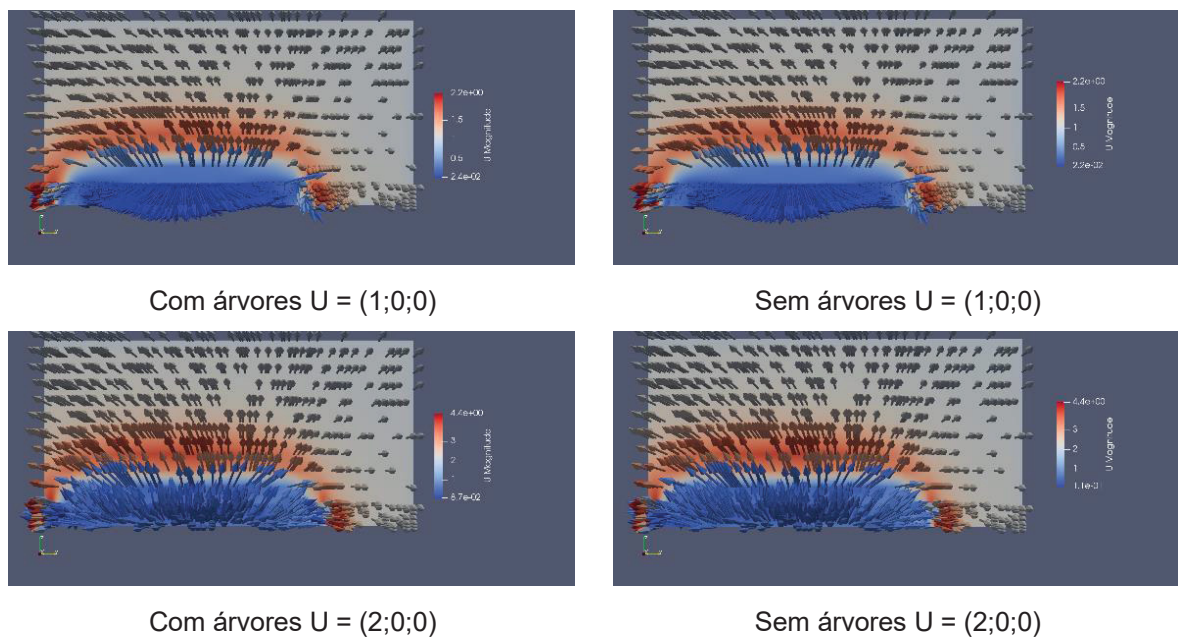
Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Velocidade média (m/s)	Concentração média de poluentes		Presença de Árvores
			(kg/m <sup>3</sup> )	(µg/m <sup>3</sup> )	
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°)	(1;0;0)	0,583	5,813x10 <sup>-9</sup>	5,813	Não
	(1;0;0)	0,580	5,792x10 <sup>-9</sup>	5,792	Sim
	(2;0;0)	1,338	1,095x10 <sup>-7</sup>	109,500	Não
	(2;0;0)	1,302	1,086x10 <sup>-7</sup>	108,600	Sim
Paralelo ao eixo principal da rua (0°)	(0;1;0)	0,567	1,895x10 <sup>-15</sup>	1,895x10 <sup>-6</sup>	Não
	(0;1;0)	0,459	1,095x10 <sup>-15</sup>	1,095x10 <sup>-6</sup>	Sim
	(0;2;0)	1,669	5,423x10 <sup>-14</sup>	5,423x10 <sup>-5</sup>	Não
	(0;2;0)	1,147	2,244x10 <sup>-14</sup>	2,244x10 <sup>-5</sup>	Sim
Oblíquo ao eixo principal da rua (45°)	(1;1;0)	0,597	1,000x10 <sup>-12</sup>	0,001	Não
	(1;1;0)	0,482	7,963x10 <sup>-13</sup>	7,963x10 <sup>-4</sup>	Sim
	(2;2;0)	1,768	2,967x10 <sup>-10</sup>	0,297	Não
	(2;2;0)	1,211	8,879x10 <sup>-11</sup>	0,089	Sim

FONTE: A autora (2023).

Observou-se que para todas as velocidades iniciais e direções do vento testadas ocorreram reduções nas concentrações de CO<sub>2</sub> na presença de árvores, sendo que as maiores foram verificadas para velocidade inicial de 2 m/s e direção do vento oblíqua (0,297 µg/m<sup>3</sup> para 0,089 µg/m<sup>3</sup> = 70,07% de redução) e paralela (5,423x10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup> para 2,244x10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup> = 58,62% de redução) ao eixo principal da rua. Em todos os cenários também foram observadas reduções nas velocidades médias em conformidade com o observado por CUI *et al.* (2019), indicando que as árvores reduziram a canalização do vento.

A FIGURA 17 apresenta os resultados dos testes para a direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua ( $90^\circ$ ), onde foi verificado que a inclusão de árvores teve influência de apenas 2,69% na redução (0,036 m/s) da velocidade média do vento na simulação com velocidade inicial de 2 m/s e de 0,51% (0,003 m/s) para 1 m/s. Dessa forma, notou-se que o campo de velocidades foi pouco alterado com a inserção das árvores, conforme observado por Li *et al.* (2016). Essa situação ocorre devido à formação de uma área de bloqueio localizada pelas árvores, resultando em uma redução na velocidade do vento nas proximidades (SRIVASTAVA, 2019).

FIGURA 17 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES - CO<sub>2</sub>



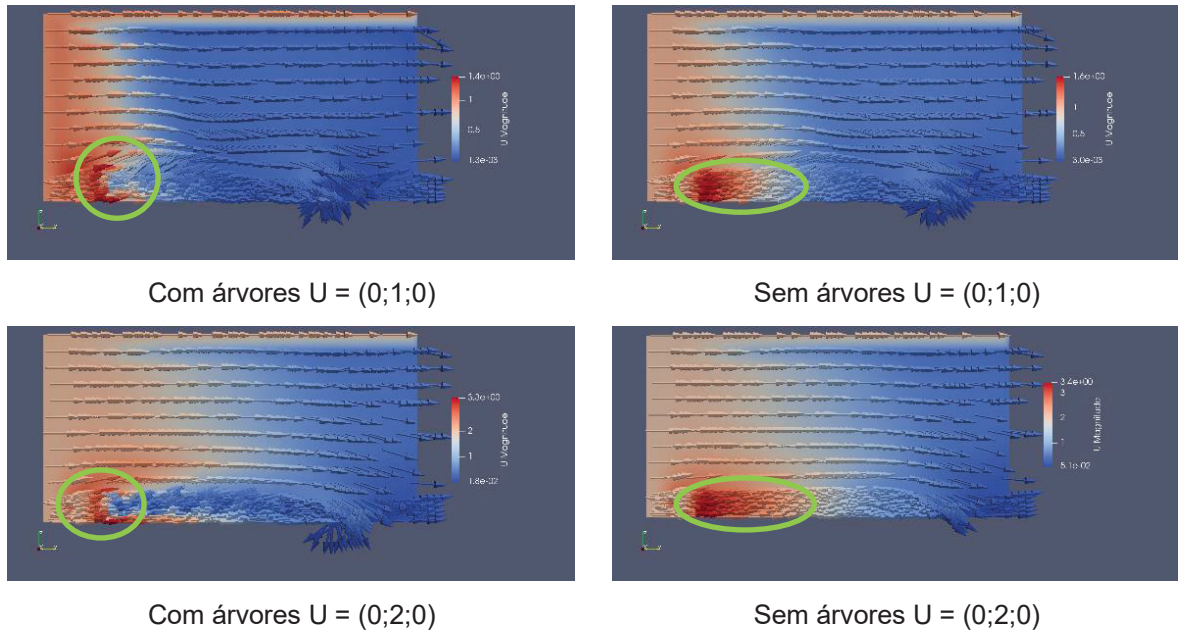
FONTE: A autora (2023).

Na FIGURA 18 estão representados os resultados dos testes para direção do vento paralela ao eixo principal da rua ( $0^\circ$ ), observa-se que nessa direção as reduções na velocidade média foram mais altas, sendo de 31,28% (0,522 m/s) e 19,05% (0,108 m/s) para velocidade inicial de 2 m/s e 1 m/s, respectivamente. No perfil do campo de velocidade das simulações com árvores verificou-se redução logo na entrada da simulação, assim como verificado por Cui *et al.*, (2019), conforme destaques em verde na FIGURA 18, principalmente perto do solo.

A FIGURA 19 apresenta os resultados das simulações para direção do vento oblíqua ao eixo principal da rua ( $45^\circ$ ), nas quais foram observadas reduções similares na ventilação natural com a inclusão de árvores: 19,26% (0,115 m/s) para velocidade

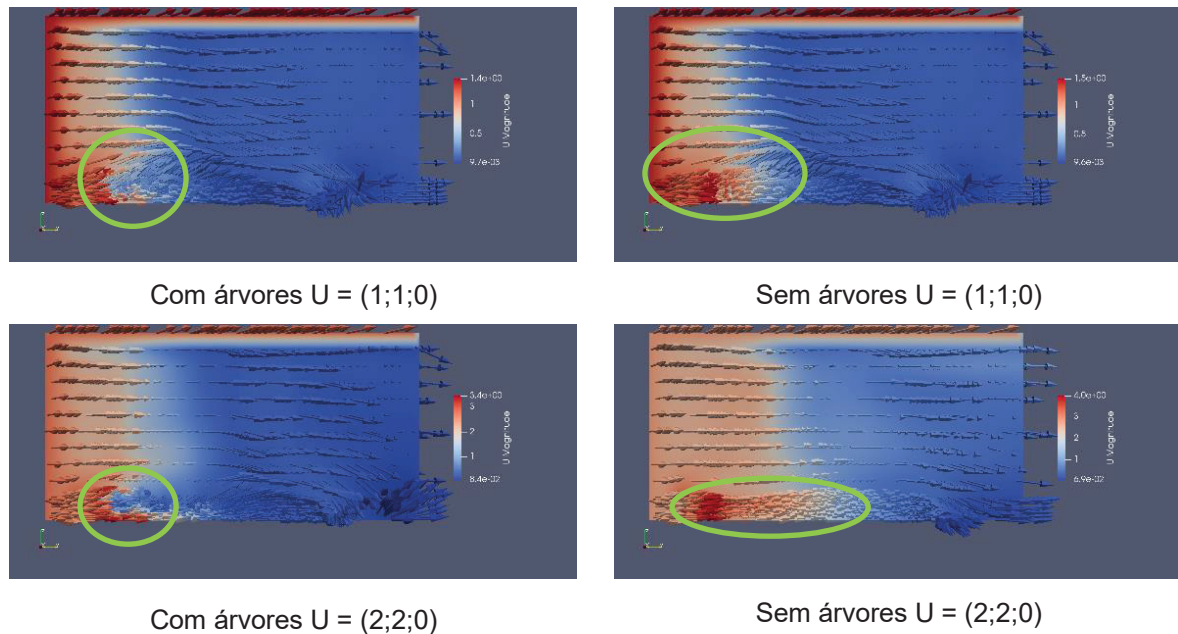
inicial de 1 m/s e 31,50% (0,557 m/s) para 2 m/s. Entre todas as simulações para diferentes direções do vento e velocidades, observou-se que na velocidade de 2 m/s ocorreu a maior redução de poluentes (70,07%).

FIGURA 18 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS - CO<sub>2</sub>



FONTE: A autora (2023).

FIGURA 19 – PERFIS DE VELOCIDADE PARA VENTOS INCIDENTES OBLÍQUOS - CO<sub>2</sub>



FONTE: A autora (2023).

Ao contrário dos ventos perpendiculares, os ventos paralelos e oblíquos permitiram uma melhoria na qualidade do ar, diminuindo em mais de 20% a concentração de poluentes nos cenários simulados. Lin *et al.* (2014) também observaram melhores condições para ventos paralelos e piores condições para ventos perpendiculares. Isso ocorre devido ao fluxo de ar contornar o ambiente em vez de ser direcionado diretamente para dentro, diminuindo a entrada de poluentes (WYLIE, 2021). A direção do vento e a interação com as características do terreno e obstáculos influenciam o padrão de dispersão dos poluentes (HUANG *et al.*, 2019).

Notou-se que as árvores alteraram o campo de velocidade no começo da rua e próximo do chão (FIGURAS 18 e 19). Apesar do coeficiente de difusão do CO<sub>2</sub> ser distinto de outros poluentes, Gromke (2011) também observou comportamentos similares com outros poluentes para as mesmas velocidades e direções do vento.

A TABELA 2 apresenta as reduções da concentração de CO<sub>2</sub> na presença de árvores em relação a velocidade inicial e direção do vento.

TABELA 2 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES

Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Variação da concentração de poluentes (%)
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°)	1,00	-0,36
	2,00	-0,82
Paralelo ao eixo principal da rua (0°)	1,00	-42,22
	2,00	-58,62
Oblíquo ao eixo principal da rua (45°)	1,00	-20,37
	2,00	-70,07

FONTE: A autora (2023).

De maneira geral, verificou-se que nas velocidades de ventos mais baixas há menor dispersão turbulenta o que influencia na menor redução da concentração de poluentes. Ainda, para ventos perpendiculares não foram observadas reduções maiores que 0,82%, dessa forma, verificou-se que a inclusão de árvores tem maior influência em direções do vento paralelas ou oblíquas ao eixo principal da rua, este efeito também foi observado por Zavala-Reyes *et al.* (2019).

Foi observado maior redução (70,07%) na concentração de CO<sub>2</sub> na presença de árvores e com o aumento do campo de velocidade, pois ocorreu mais ventilação no *canyon* e, conseqüentemente, melhor dispersão dos poluentes.

## 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

É importante destacar que, devido a restrições práticas, não foi possível reproduzir exatamente as mesmas condições iniciais, modelo de simulação, valores das variáveis e/ou tipo de poluente encontrados na literatura. No entanto, foram realizadas aproximações criteriosas a fim de estabelecer relações significativas entre os resultados. Um dos principais critérios considerados foi a velocidade do vento e o tipo de *canyon*, os quais desempenham um papel fundamental na dispersão de poluentes (WU *et al.*, 2022).

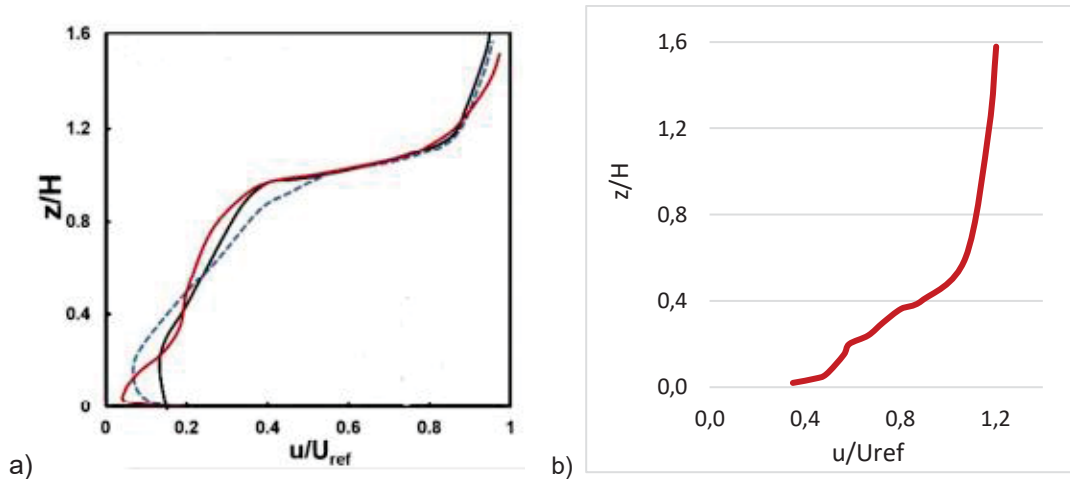
Portanto, optou-se por utilizar um *canyon* regular com uma relação  $W/H=1,0$  (largura/altura), direções de vento e velocidades iniciais praticamente iguais. Embora existam diferenças nas condições específicas, essa abordagem permitiu estabelecer uma base de comparação válida e relevante para avaliar os resultados obtidos.

Para validação do modelo foram utilizadas simulações de  $CO_2$ . Primeiro, foi feita a validação do fluxo do ar com velocidade baixa, onde foi testada uma simulação com velocidade inicial de 1,0 m/s e direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua ( $90^\circ$ ). Os resultados foram comparados com Xiong e Chen (2021), os quais realizaram simulações CFD no OpenFOAM com mesma direção do vento, porém com velocidade inicial de 0,5 m/s.

A FIGURA 20 apresenta os resultados obtidos, onde foi verificada uma curva de resultados semelhante a curva obtida no OpenFOAM (linha vermelha) por Xiong e Chen (2021), com tendência de crescimento exponencial. Observa-se que a velocidade aumenta conforme a relação de  $z/H$  é maior. A principal diferença verificada foi que no estudo comparativo a relação de  $z/H$  igual a 1 apresentou estabilidade da velocidade com pouco crescimento, entretanto, a partir de 0,8  $u/U_{ref}$  a velocidade voltou a subir com o aumento da relação  $z/H$ .

Para validação do fluxo do ar com velocidade inicial de 2,0 m/s e direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua ( $90^\circ$ ) foram comparados os resultados com o banco de dados da CODASC no experimento de túnel de vento, porém esse apresentava seção transversal de 2 m de largura e 1 m de altura e era confinado por paredes verticais lisas e teto. Já na simulação testada a seção apresentou 10 m de largura e altura e também era confinada pelas paredes, entretanto não tinha o teto.

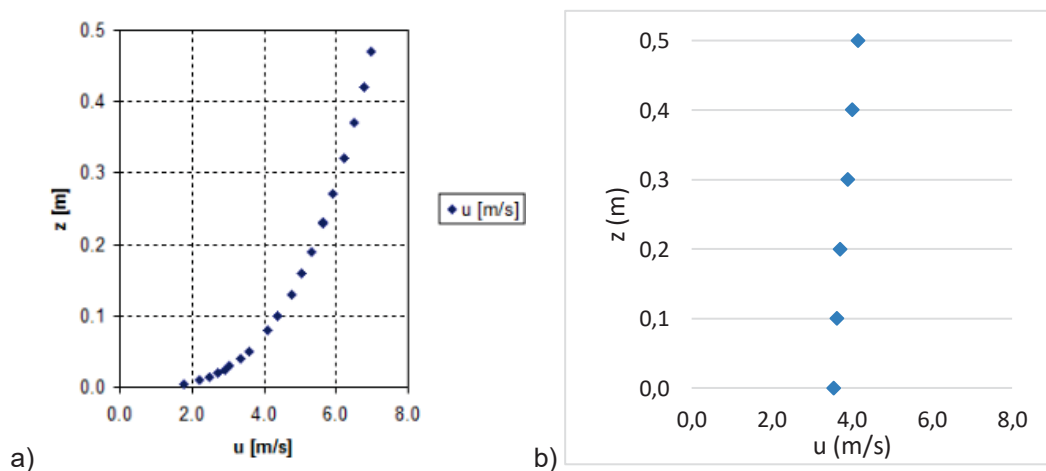
FIGURA 20 – VALIDAÇÃO DO FLUXO DO AR: VELOCIDADE INICIAL ATÉ 1,0 m/s



Fonte: a) Xiong e Chen (2021). b) A autora (2023).

A FIGURA 21 apresenta o comparativo dos resultados obtidos pela CODASC até 0,5 m de altura e no presente estudo, onde verificou-se que a velocidade do vento foi mais alta conforme a altura do prédio e também apresenta crescimento exponencial. Foi observado que Gromke e Ruck (2012) verificaram um perfil de velocidade com maior tendência de aumento da concentração, entretanto, o experimento realizado foi em um túnel de vento totalmente fechado, enquanto a simulação testada foi executada em ambiente aberto em cima e com dimensões maiores de largura e altura, a qual não demonstrou crescimento acelerado da velocidade.

FIGURA 21 – VALIDAÇÃO DO FLUXO DO AR: VELOCIDADE A PARTIR DE 2,0 m/s

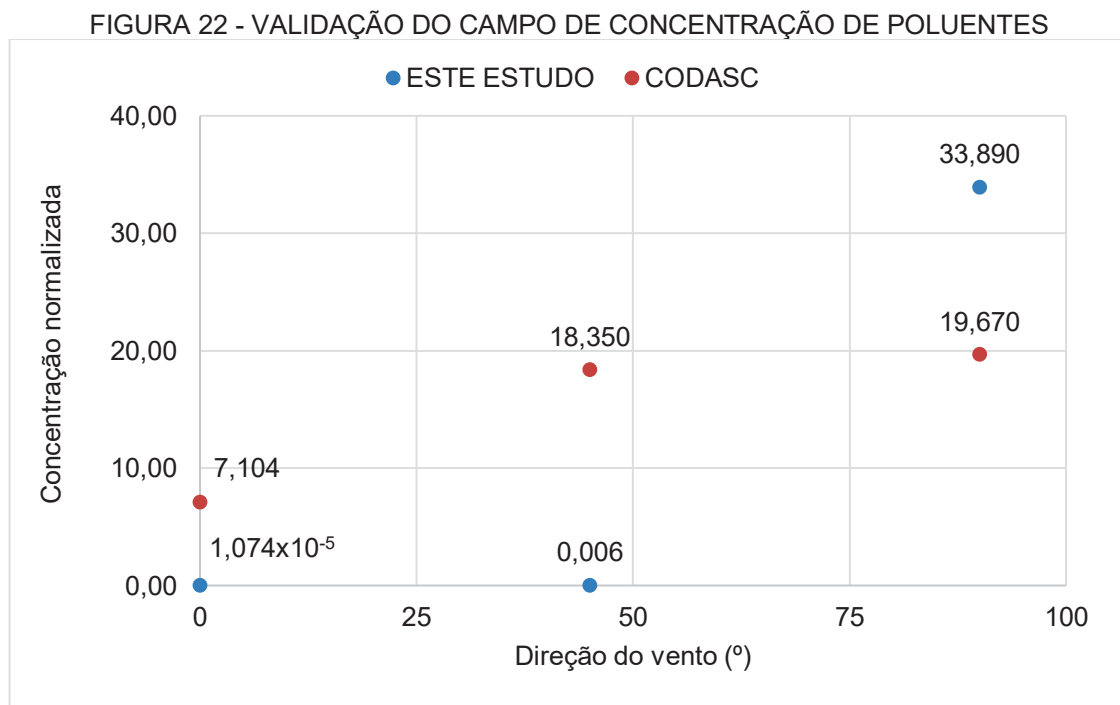


Fonte: a) CODASC/Gromke e Ruck (2012). b) A autora (2023).



Para validação do campo de concentração de poluentes foram comparados os testes realizados para velocidade inicial de 1,0 m/s com as simulações do banco de dados da CODASC para distintas direções do vento. As concentrações foram normalizadas a fim de comparar os resultados, pois a CODASC utilizou  $z/H=1$  e o  $SF_6$  que apresenta peso molecular de 146,05 g/mol e densidade relativa de 5,346 ( $ar=1$ ) a 21°C, enquanto este estudo utilizou  $z/H=10$  e testou o  $CO_2$  que possui peso molecular de 44,01 g/mol e densidade relativa de 1,519 ( $ar=1$ ) a 21°C (IBG, 2016 e 2015).

A FIGURA 22 ilustra os resultados obtidos para direção do vento paralela, oblíqua perpendicular ao eixo principal da rua.



Fonte: Adaptado de CODASC/Gromke e Ruck (2012).

Os resultados obtidos indicaram padrões similares no campo de concentrações, pois para a direção perpendicular do vento foram verificadas as maiores concentrações, seguida pela direção oblíqua e paralela ao eixo principal da rua. Cabe destacar que as diferenças obtidas podem ter sido originadas da geometria utilizada e dos valores dos parâmetros iniciais devido as características distintas dos poluentes, por exemplo, o  $CO_2$  é menos denso do que o  $SF_6$ , podendo ter se

dispersado durante a simulação o que ocasionou em menor concentração dentro do *canyon*.

### 4.3 SIMULAÇÕES DE POLUENTES EM CENÁRIOS COM E SEM ÁRVORES

Foram realizadas simulações usando o modelo validado e calibrado para analisar como a presença ou ausência de árvores afeta a concentração de poluentes. Utilizou-se a concentração real de poluentes emitida por um único veículo, com base em estudos anteriores, e adaptou-se às condições da simulação. Isso permitiu uma avaliação mais precisa do impacto das árvores na dispersão dos poluentes analisados.

É importante destacar que as concentrações de CO<sub>2</sub> foram significativamente maiores do que as concentrações de MP<sub>2,5</sub>, com diferenças de várias ordens de grandeza. Isso ocorre devido ao coeficiente de difusão e à concentração inicial de CO<sub>2</sub> nos gases de escape dos veículos serem mais elevados em comparação ao MP<sub>2,5</sub>.

#### 4.3.1 Resultados das simulações de CO<sub>2</sub>

O CO<sub>2</sub> foi selecionado devido a ser um dos gases mais prejudiciais à saúde humana (BASIŃSKA *et al.*, 2021). O modelo utilizado apresentou algumas limitações como apenas uma forma de entrada de velocidade na simulação para cada direção do vento e avaliação de uma única geometria.

Os resultados obtidos nas simulações de CO<sub>2</sub> para as seções no meio da rua são apresentados na TABELA 3, enquanto na TABELA 4 é possível verificar as variações das concentrações – redução ou aumento - obtidas com a inclusão de árvores.

As FIGURAS 23 a 28 apresentam os perfis de velocidade e de concentração de CO<sub>2</sub> para ventos incidentes perpendiculares com velocidade inicial de 0,10 m/s, 1,00 m/s e 2,00 m/s, incluindo o cenário com e sem árvores na seção longitudinal no meio da rua e transversal em 1,65 m de altura.

Os resultados obtidos das seções longitudinais em diferentes alturas são apresentados na TABELA 5 para direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua (90°).

TABELA 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO<sub>2</sub>

Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Velocidade média (m/s)	Concentração média de poluentes		Presença de Árvores
			(kg/m <sup>3</sup> )	(µg/m <sup>3</sup> )	
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção longitudinal no meio da rua	(0,1;0;0)	0,069	3,130x10 <sup>-11</sup>	0,031	Não
	(0,1;0;0)	0,052	2,900x10 <sup>-11</sup>	0,029	Sim
	(1;0;0)	0,670	1,394x10 <sup>-5</sup>	1,394x10 <sup>4</sup>	Não
	(1;0;0)	0,540	1,461x10 <sup>-5</sup>	1,461x10 <sup>4</sup>	Sim
	(2;0;0)	1,356	2,257x10 <sup>-4</sup>	2,257x10 <sup>5</sup>	Não
	(2;0;0)	1,026	2,226x10 <sup>-4</sup>	2,226x10 <sup>5</sup>	Sim
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	(0,1;0;0)	0,080	5,048x10 <sup>-12</sup>	0,0050	Não
	(0,1;0;0)	0,073	4,833x10 <sup>-12</sup>	0,0048	Sim
	(1;0;0)	0,780	3,306x10 <sup>-7</sup>	330,600	Não
	(1;0;0)	0,751	3,500x10 <sup>-7</sup>	350,000	Sim
	(2;0;0)	1,516	4,458x10 <sup>-6</sup>	4.458,000	Não
	(2;0;0)	1,392	3,248x10 <sup>-6</sup>	3.248,000	Sim
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção longitudinal no meio da rua	(0;0,1;0)	0,012	1,452x10 <sup>-17</sup>	1,452x10 <sup>-8</sup>	Não
	(0;0,1;0)	0,010	9,217x10 <sup>-18</sup>	9,217x10 <sup>-9</sup>	Sim
	(0;1;0)	0,118	5,200x10 <sup>-12</sup>	0,005	Não
	(0;1;0)	0,093	3,000x10 <sup>-12</sup>	0,003	Sim
	(0;2;0)	0,285	3,165x10 <sup>-10</sup>	0,317	Não
	(0;2;0)	0,273	1,940x10 <sup>-10</sup>	0,194	Sim
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	(0;0,1;0)	0,012	6,468x10 <sup>-18</sup>	6,468x10 <sup>-9</sup>	Não
	(0;0,1;0)	0,013	6,034x10 <sup>-18</sup>	6,034x10 <sup>-9</sup>	Sim
	(0;1;0)	0,161	1,094x10 <sup>-13</sup>	1,094x10 <sup>-4</sup>	Não
	(0;1;0)	0,157	1,925x10 <sup>-13</sup>	1,925x10 <sup>-4</sup>	Sim
	(0;2;0)	0,357	5,000x10 <sup>-12</sup>	0,005	Não
	(0;2;0)	0,381	7,000x10 <sup>-12</sup>	0,070	Sim

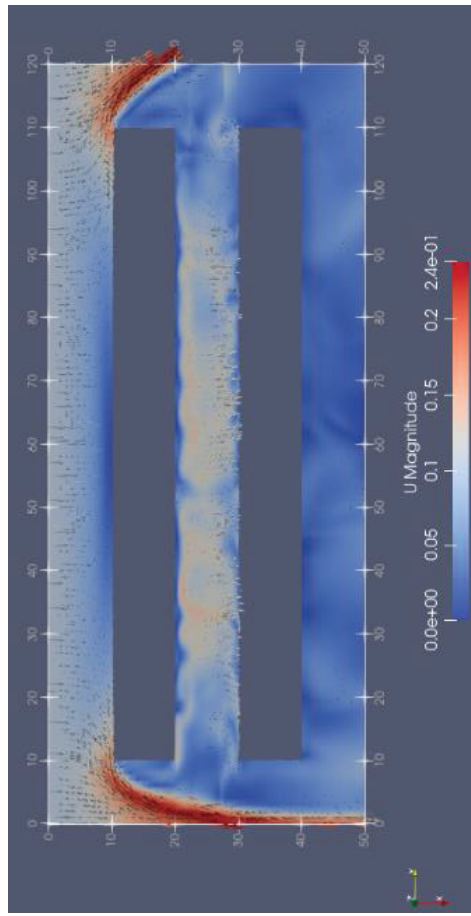
FONTE: A autora (2023).

TABELA 4 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NA PRESENÇA DE ÁRVORES

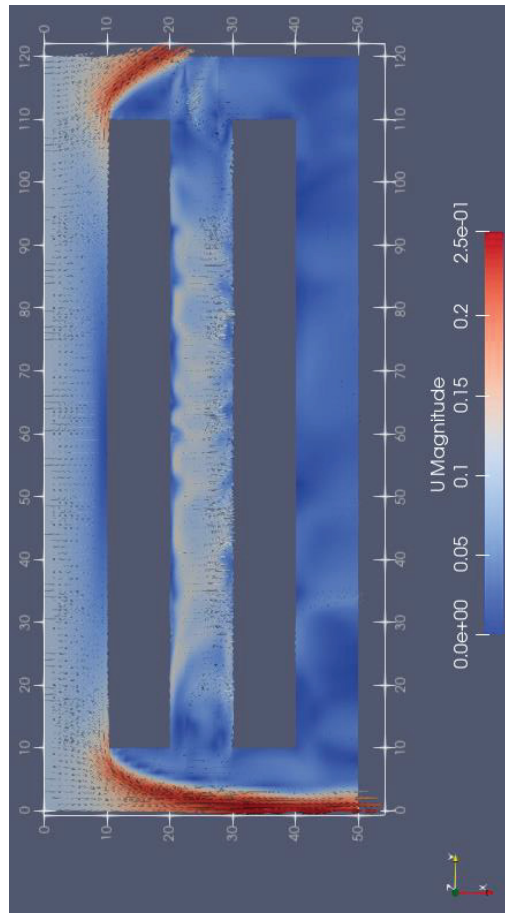
Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Variação da concentração de poluentes (%)
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção longitudinal no meio da rua	0,10	-6,45
	1,00	4,81
	2,00	-1,37
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	0,10	-4,26
	1,00	5,87
	2,00	-27,14
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção longitudinal no meio da rua	0,10	-36,52
	1,00	-50,35
	2,00	-38,71
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	0,10	-6,71
	1,00	75,96
	2,00	48,86

FONTE: A autora (2023).

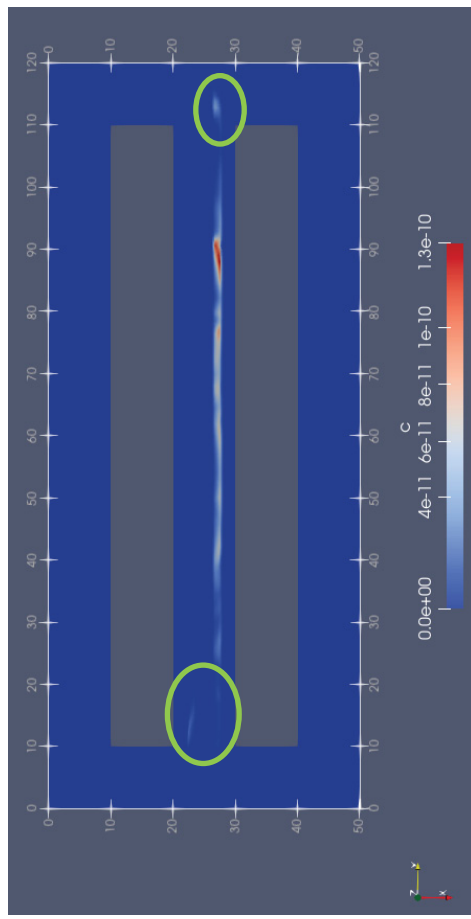
FIGURA 23 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0, 1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



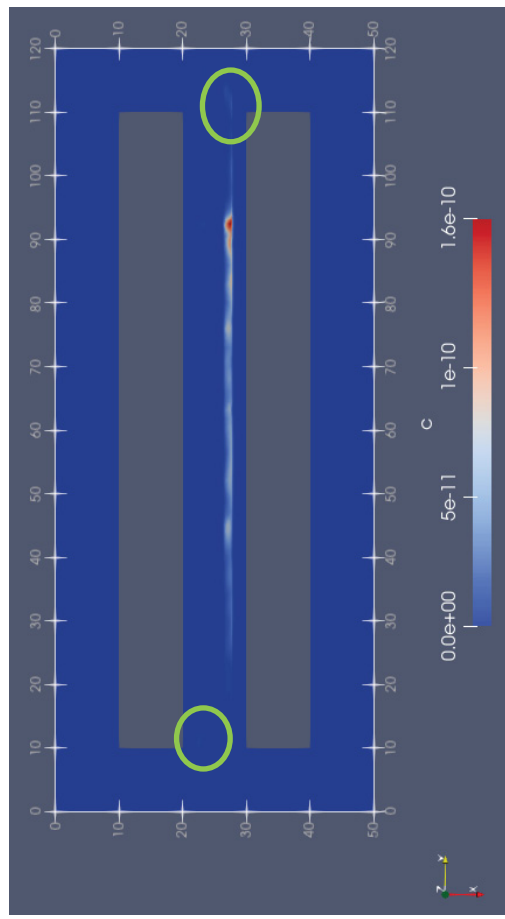
Sem árvores - U = (0, 1;0;0)



Com árvores - U = (0, 1;0;0)



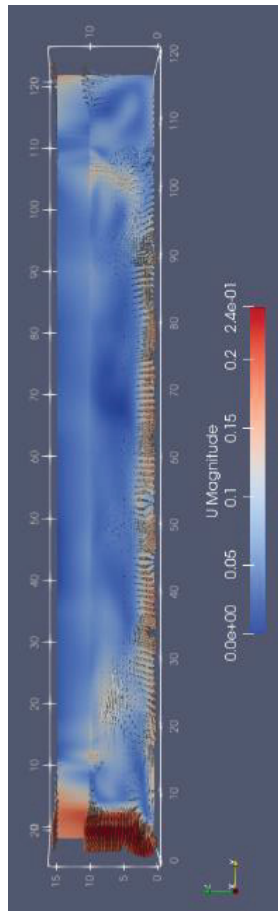
Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



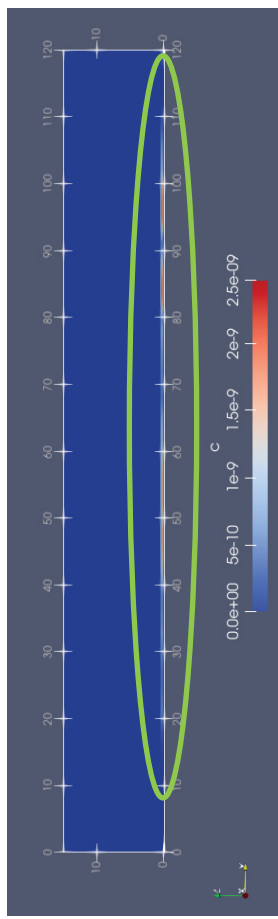
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

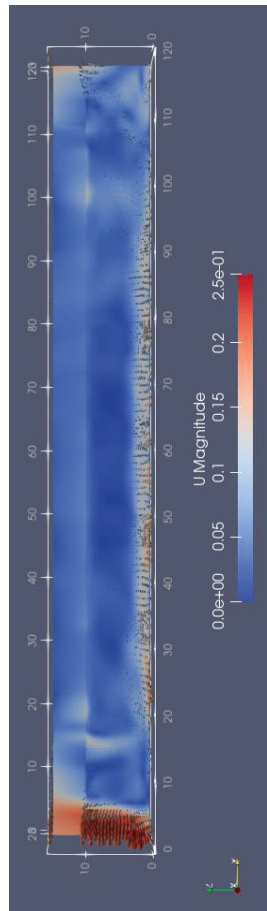
FIGURA 24 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0, 1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



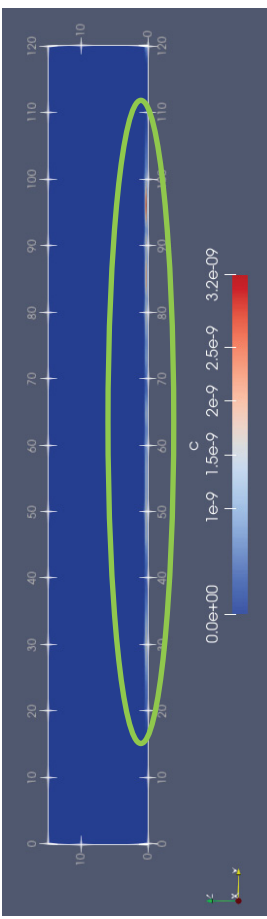
Sem árvores - U = (0,1;0;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



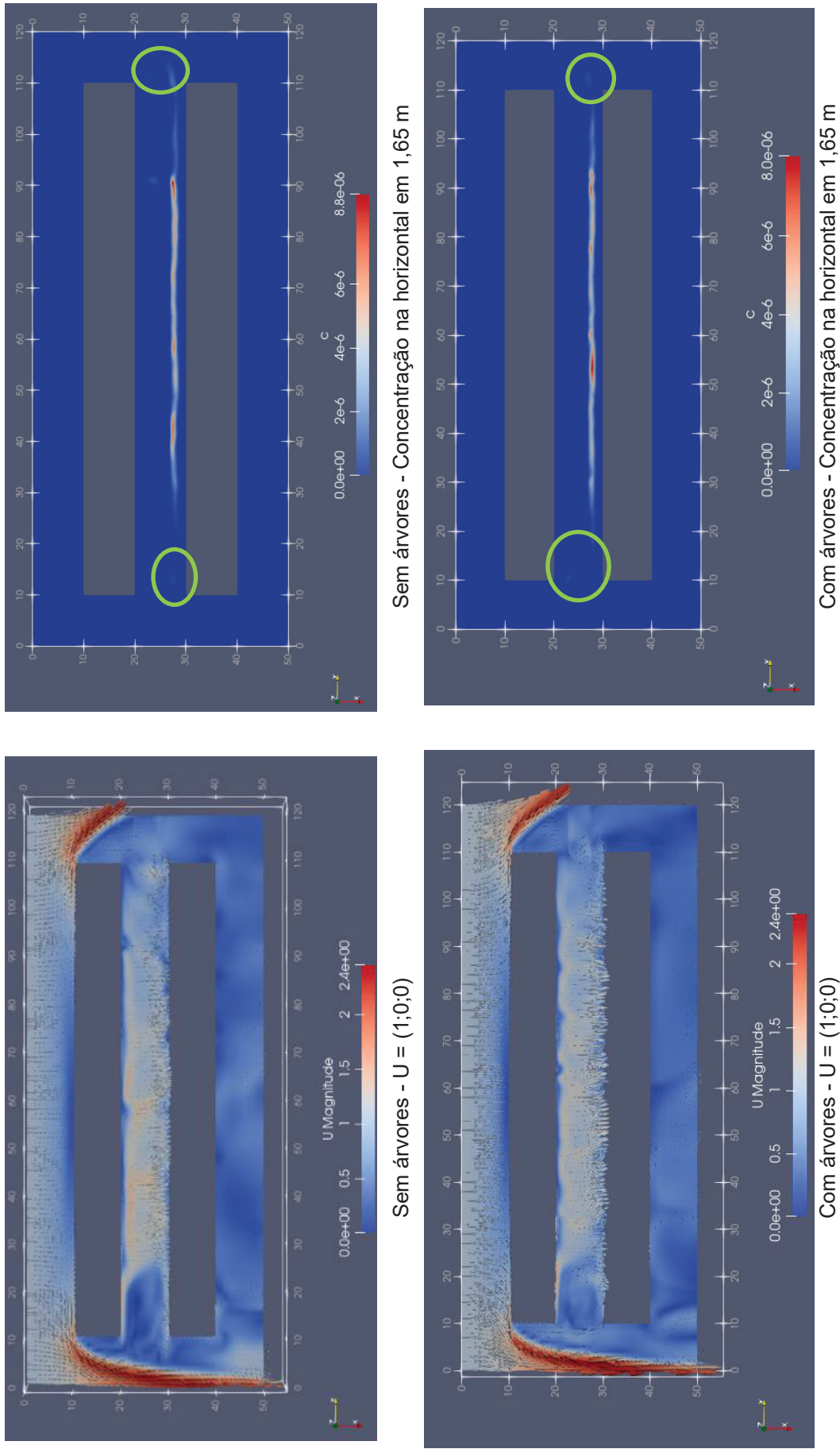
Com árvores - U = (0, 1;0;0)



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

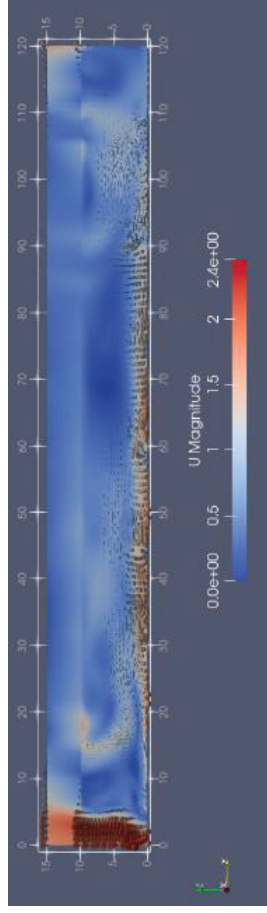
FONTE: A autora (2023).

FIGURA 25 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA

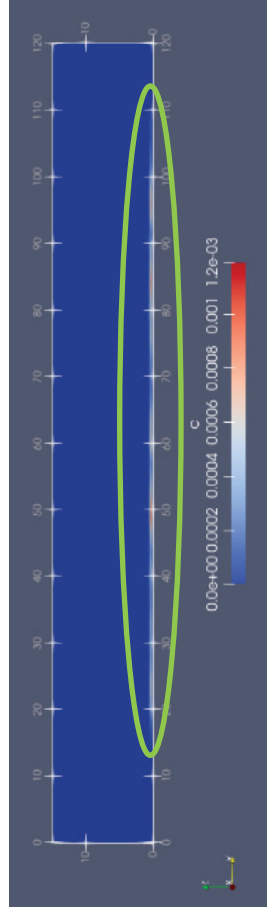


FONTE: A autora (2023).

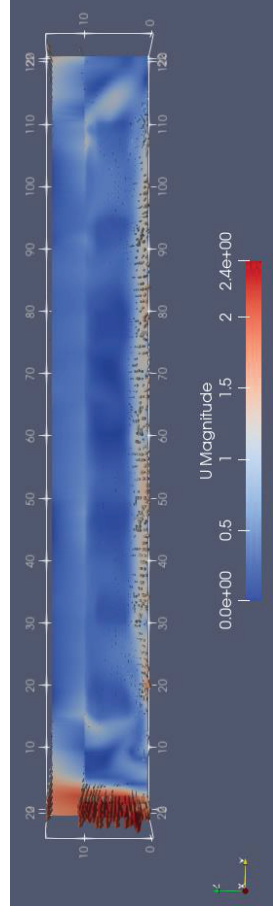
FIGURA 26 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



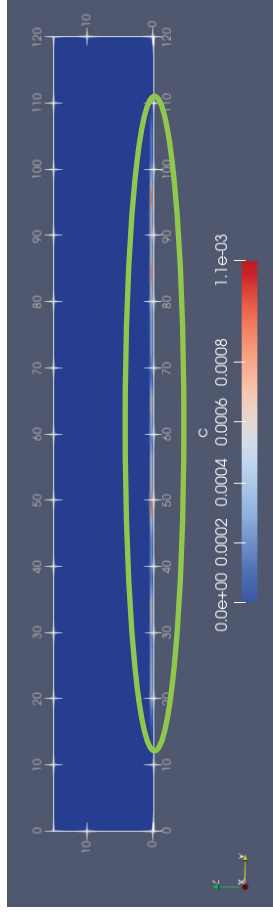
Sem árvores - U = (1;0;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



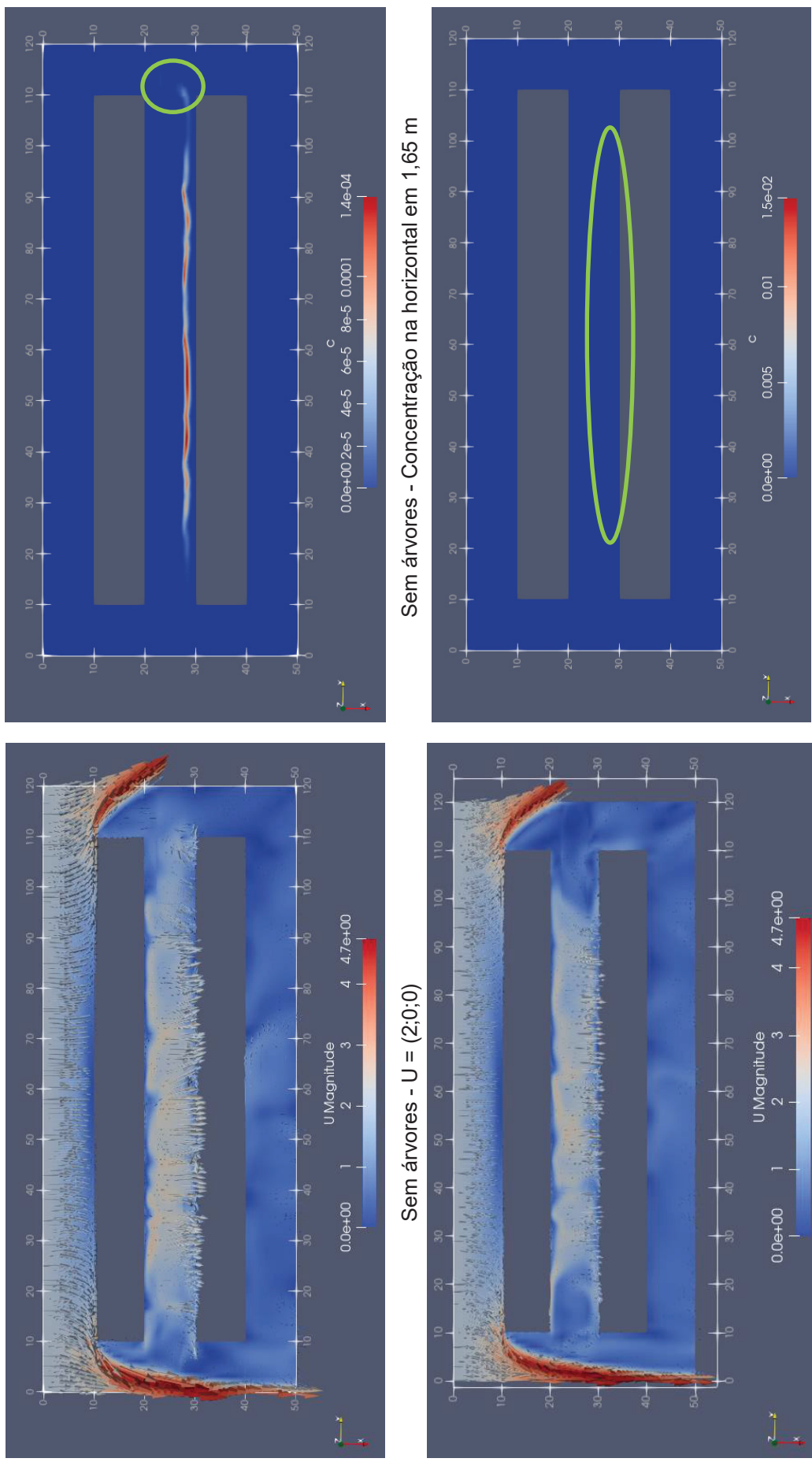
Com árvores - U = (1;0;0)



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 27 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA

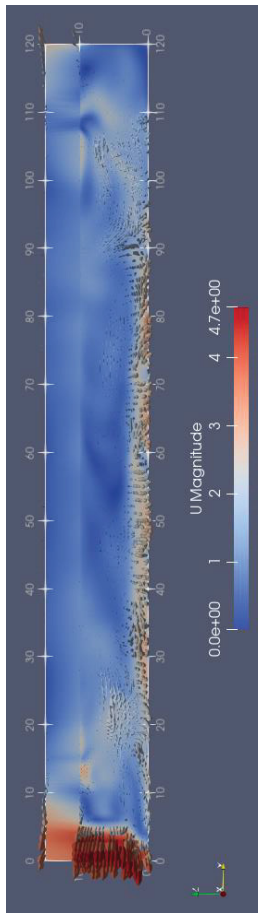


Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

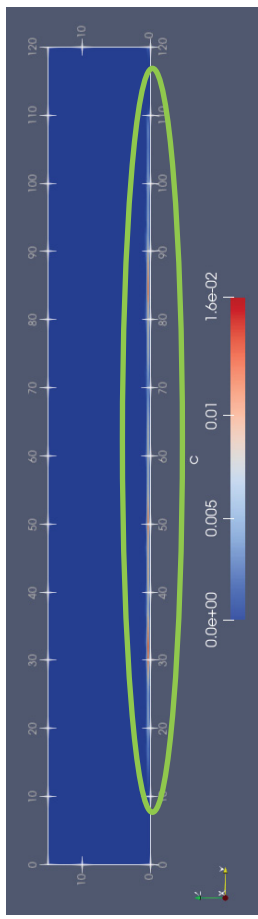
FONTE: A autora (2023).



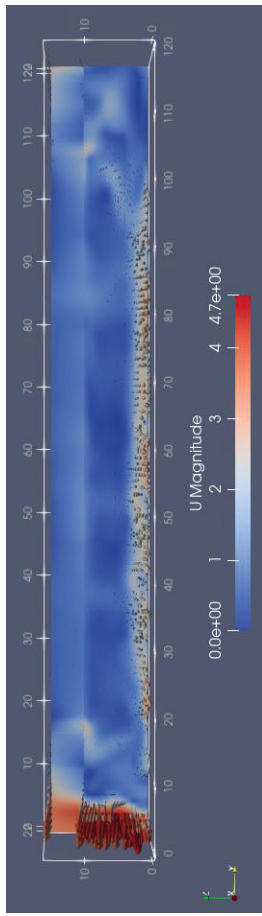
FIGURA 28 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (2;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



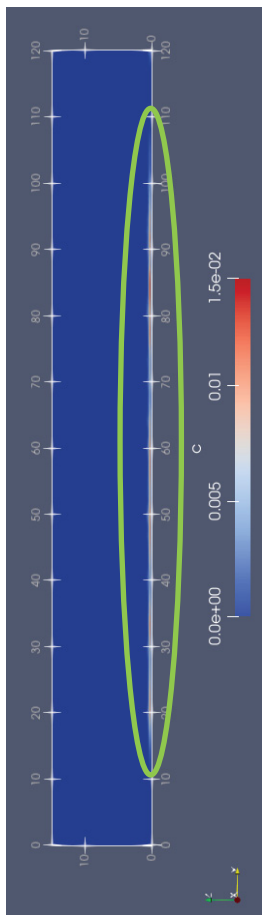
Sem árvores - U = (2;0;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - U = (2;0;0)



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

TABELA 5 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO<sub>2</sub>: PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (90°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS

U inicial (m/s)	Altura (m)	Sem árvores			Com árvores			Variação da C média (%)
		U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	
0,100	1,000	0,107	3,220x10 <sup>-15</sup>	3,220x10 <sup>-6</sup>	0,108	2,360x10 <sup>-14</sup>	2,360x10 <sup>-5</sup>	632,919
	1,500	0,097	1,110x10 <sup>-20</sup>	1,110x10 <sup>-11</sup>	0,093	1,230x10 <sup>-19</sup>	1,230x10 <sup>-10</sup>	1.008,108
	1,650	0,097	1,570x10 <sup>-20</sup>	1,570x10 <sup>-11</sup>	0,090	7,730x10 <sup>-21</sup>	7,730x10 <sup>-12</sup>	-50,764
	2,000	0,081	2,210x10 <sup>-24</sup>	2,210x10 <sup>-15</sup>	0,072	5,470x10 <sup>-24</sup>	5,470x10 <sup>-15</sup>	147,511
	3,000	0,063	6,950x10 <sup>-35</sup>	6,950x10 <sup>-26</sup>	0,042	5,060x10 <sup>-35</sup>	5,060x10 <sup>-26</sup>	-27,194
	4,000	0,045	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000
	10,000	0,067	0,000	0,000	0,055	0,000	0,000	0,000
1,000	1,000	1,075	2,310x10 <sup>-7</sup>	231,000	0,441	1,280x10 <sup>-11</sup>	0,013	-99,994
	1,500	0,890	5,530x10 <sup>-10</sup>	0,553	1,044	2,070x10 <sup>-10</sup>	0,207	-62,568
	1,650	0,805	2,900x10 <sup>-11</sup>	0,029	2,017	2,280x10 <sup>-11</sup>	0,023	-21,379
	2,000	0,729	1,000x10 <sup>-12</sup>	0,001	0,763	2,320x10 <sup>-19</sup>	2,320x10 <sup>-10</sup>	-100,000
	3,000	0,587	4,540x10 <sup>-17</sup>	4,540x10 <sup>-8</sup>	0,552	1,970x10 <sup>-20</sup>	1,970x10 <sup>-11</sup>	-99,957
	4,000	0,564	7,740x10 <sup>-21</sup>	7,740x10 <sup>-12</sup>	0,339	2,940x10 <sup>-26</sup>	2,940x10 <sup>-17</sup>	-100,000
	10,000	0,656	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	0,000
2,000	1,000	2,018	1,130x10 <sup>-5</sup>	1,130x10 <sup>4</sup>	1,821	1,030x10 <sup>-5</sup>	1,030x10 <sup>4</sup>	-8,850
	1,500	1,860	2,710x10 <sup>-8</sup>	27,100	1,587	9,270x10 <sup>-9</sup>	9,270	-65,793
	1,650	1,748	1,830x10 <sup>-9</sup>	1,830	1,445	3,180x10 <sup>-10</sup>	0,318	-82,623
	2,000	1,621	1,360x10 <sup>-10</sup>	0,136	1,289	1,300x10 <sup>-11</sup>	0,013	-90,579
	3,000	1,256	3,930x10 <sup>-14</sup>	3,930x10 <sup>-5</sup>	0,824	1,060x10 <sup>-15</sup>	1,060x10 <sup>-6</sup>	-97,303
	4,000	1,105	4,970x10 <sup>-17</sup>	4,970x10 <sup>-8</sup>	0,652	6,530x10 <sup>-19</sup>	6,530x10 <sup>-10</sup>	-98,686
	10,000	1,288	0,000	0,000	1,098	0,000	0,000	0,000

FONTE: A autora (2023).

Nas simulações para ventos incidentes perpendiculares foi possível verificar que o vento entra na rua atrás de um lado dos prédios, conforme estipulado na entrada do *software*, e se torna mais forte nos cantos atingindo até 1,516 m/s de velocidade média na simulação com velocidade inicial de 2,00 m/s, pois os prédios impediram a passagem do vento, assim o vento nos cantos se particionou e entrou dentro do *canyon* (FIGURA 27).

Verificou-se por meio da análise das FIGURAS 23, 25 e 27 que o particionamento do vento dos cantos para entrar dentro do *canyon* contribuiu para a dispersão do poluente na região central da rua, conforme verificado na TABELA 3, foram observadas concentrações de até 4.458,00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  no cenário sem árvores para velocidade inicial de 2,00 m/s nas seções transversais efetuadas em 1,65 m de altura, ou seja, na altura média de respiração dos pedestres, motoristas e moradores do andar térreo dos edifícios.

Já na seção longitudinal realizada no meio da rua entre 0 m e 15 m de altura (FIGURAS 24, 26 e 28) observou-se que os poluentes ficaram mais próximos do solo, ou seja, do local de emissão do poluente pelo escapamento do veículo e atingiram até  $2,257 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no cenário sem árvores para velocidade inicial de 2,00 m/s, de acordo com a TABELA 3. Bender e Dziejcz (2012) também observaram que para velocidades iniciais do vento menores que 2,00 m/s os poluentes se acumulam próximo a fonte.

Ao incluir árvores nas simulações realizadas para as três velocidades iniciais do vento adotadas, para ventos incidentes perpendiculares, notou-se que a concentração de poluentes reduziu até 27,14% na seção transversal em 1,65 m de altura para velocidade inicial de 2,00 m/s e 6,45% para velocidade de 0,10 m/s (TABELA 4), indicando que as árvores auxiliaram na redução dos contaminantes nessa altura. Cabe salientar que para velocidade inicial de 1,00 m/s foi verificado aumento de até 5,87% na concentração de poluentes, de acordo com Depaul e Sheih (1986) que constataram que ventos sinóticos com velocidade inferior a 1,50 m/s tendem a remover o vórtice de dentro do *canyon*, induzindo ao ar estagnado na rua e dessa forma em aumento na concentração.

Os resultados da variação da concentração média em diferentes alturas após a adição das árvores (TABELA 5) indicaram que para velocidade inicial de 0,10 m/s foi verificado aumento nas concentrações superior a 1.000% ( $1,230 \times 10^{-10} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) na altura de 1,50 m, apesar de ser um valor elevado e indicar um possível erro durante

os cálculos efetuados pelo *software* ou ter sido ocasionado devido à baixa velocidade do vento na dispersão do poluente em maiores alturas. Para as demais velocidades iniciais foram verificadas reduções nas concentrações, sendo o máximo de 100% na altura de 2,00 m e 4,00 m para a velocidade inicial de 1,00 m/s. Esses resultados estão de acordo com Buccolieri *et al.* (2009) que constataram que as árvores tem um efeito de obstrução do vento levando a diminuição da ventilação e dispersão de poluentes até 2,00 m do solo.

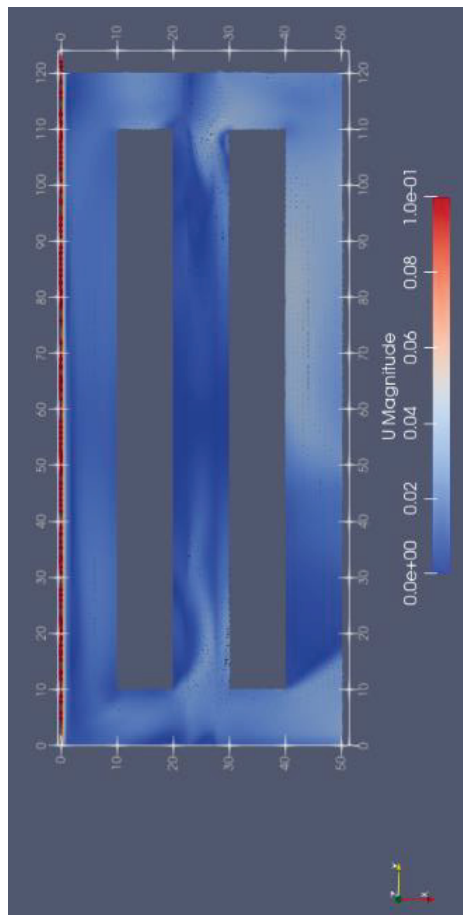
As FIGURAS 29 a 34 apresentam os perfis de velocidade e de concentração de CO<sub>2</sub> para ventos incidentes paralelos com velocidade inicial de 0,10 m/s, 1,00 m/s e 2,00 m/s, incluindo o cenário com e sem árvores na seção longitudinal no meio da rua e transversal em 1,65 m de altura.

Conforme observado nas FIGURAS 29 a 34, nas simulações para ventos incidentes paralelos notou-se que a velocidade entra no início da rua pelo lado esquerdo, como estipulado na entrada do *software*, e se distribui de forma homogênea ao longo do comprimento atrás dos edifícios, porém na região central do *canyon* ela apresenta menor velocidade (sendo o máximo de 0,381 m/s para velocidade inicial de 2,00 m/s) em relação a direção perpendicular (1,516 m/s para a mesma velocidade) devido a forma de entrada do poluente no *canyon*.

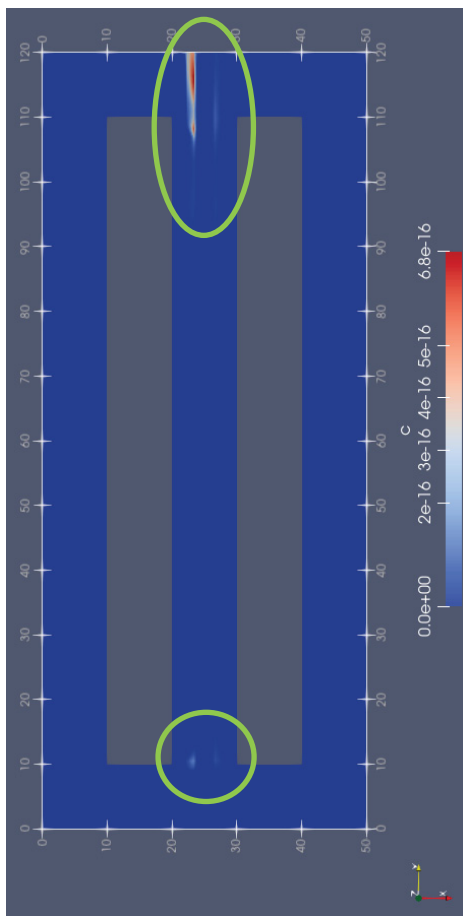
Verificou-se pela análise das figuras supracitadas que no início e no final da rua ocorre um acúmulo de concentração, sendo que no final da rua foram notadas concentrações mais altas na seção longitudinal no meio da rua sem a presença de árvores para velocidade inicial de 2,00 m/s (concentração máxima de  $1,420 \times 10^7$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em comparação com o meio da rua ( $1,340 \times 10^7$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Os redemoinhos de velocidade (colorações azuis mais claras a branco avermelhadas nas figuras) foram formados e ocasionaram em velocidades médias de 1,12 m/s na distância de 40 m a 80 m e 1,23 m/s na distância de 80 m a 120 m ao longo do comprimento da rua, fazendo com que maiores velocidades proporcionassem o acúmulo do poluente nesses pontos devido a zona de alta velocidade em volta de uma baixa velocidade, como destacado em verde na FIGURA 30. Isso ocorre devido ao acréscimo de concentração nos cantos em razão das árvores no final da rua que atuaram como obstáculos dificultando o fluxo lateral dos redemoinhos que entram no *canyon*, resultados similares aos obtidos por Gromke e Ruck (2007).

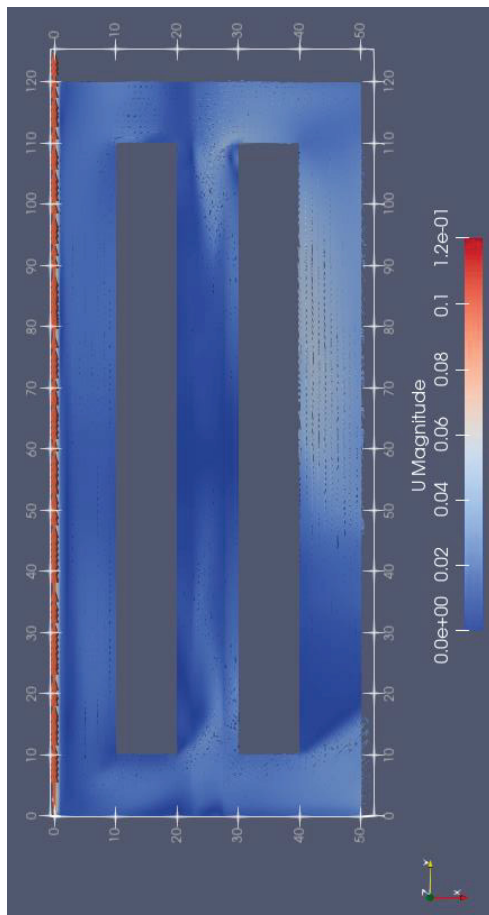
FIGURA 29 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



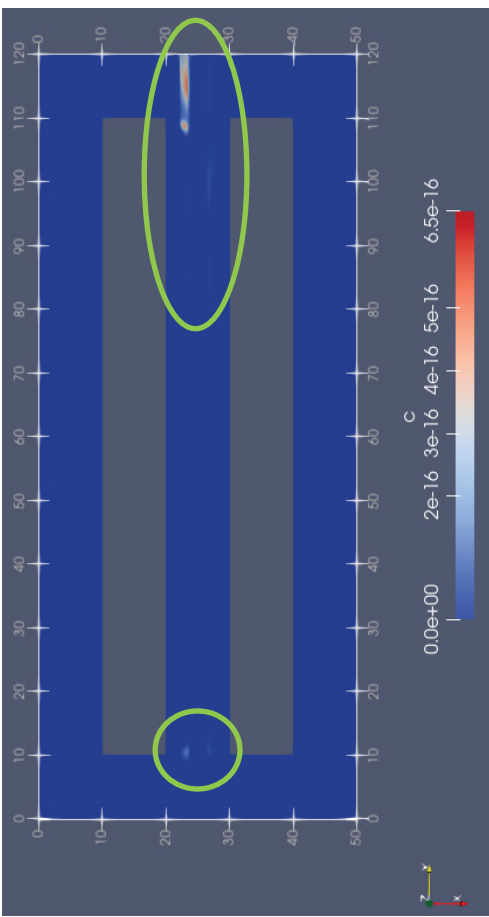
Sem árvores - U = (0;0,1;0)



Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



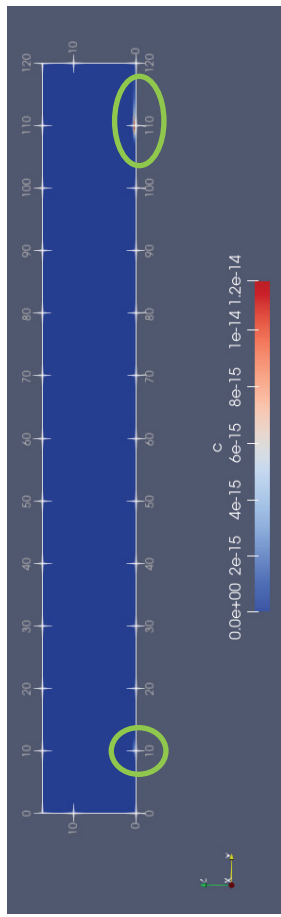
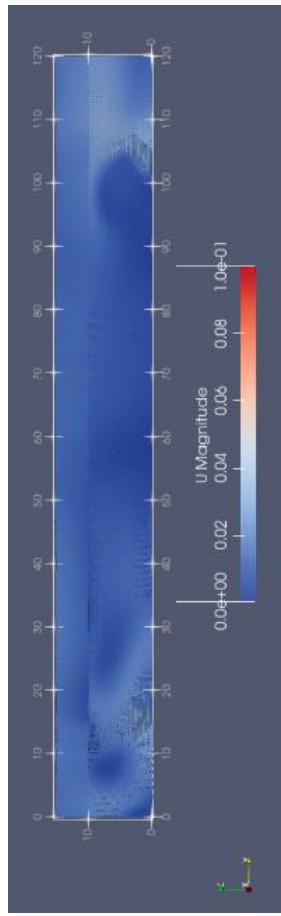
Com árvores - U = (0;0,1;0)



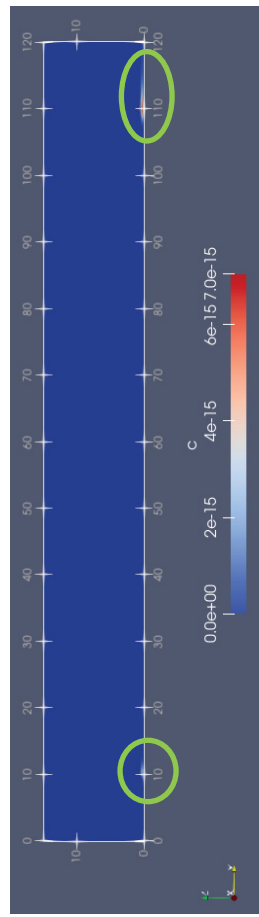
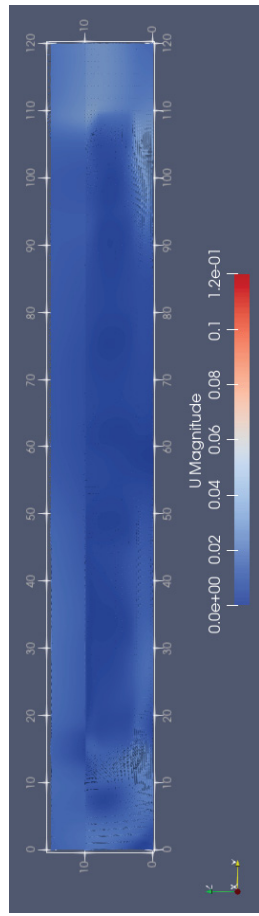
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 30 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



Sem árvores - U = (0;0,1;0)

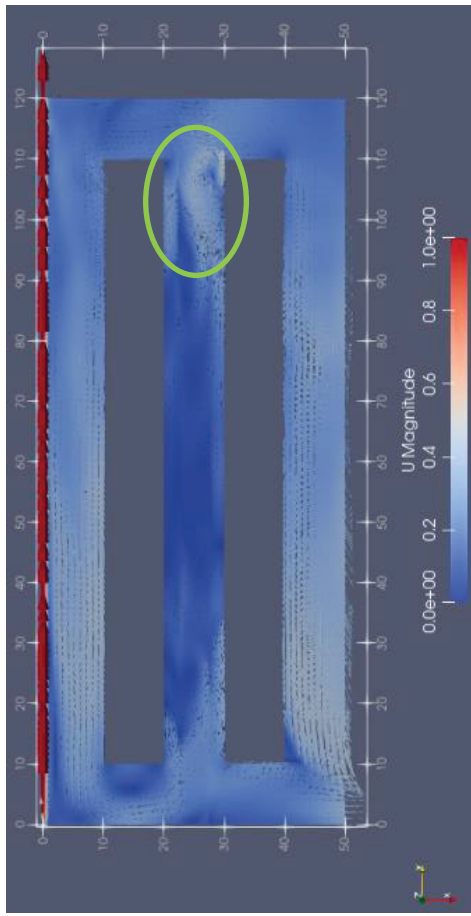


Com árvores - U = (0;0,1;0)

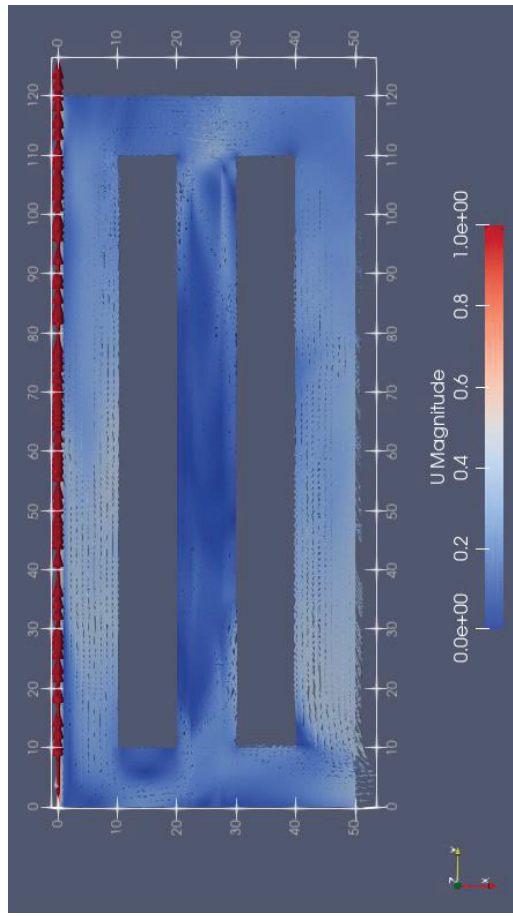
Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

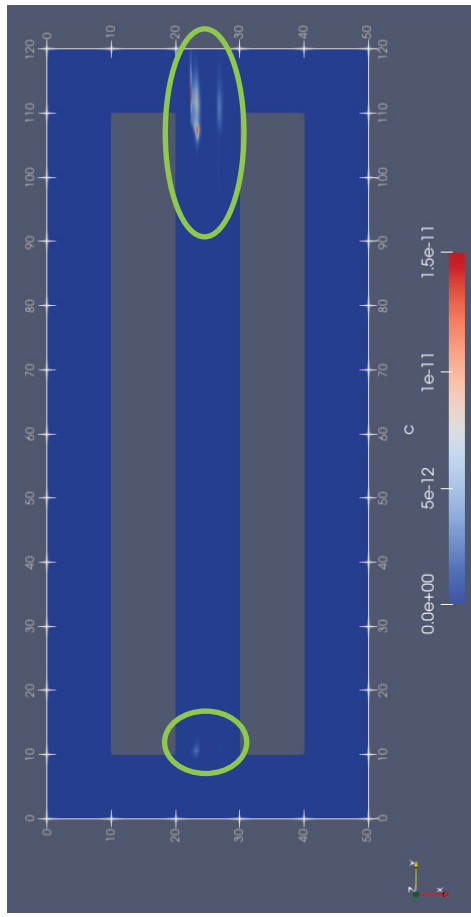
FIGURA 31 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



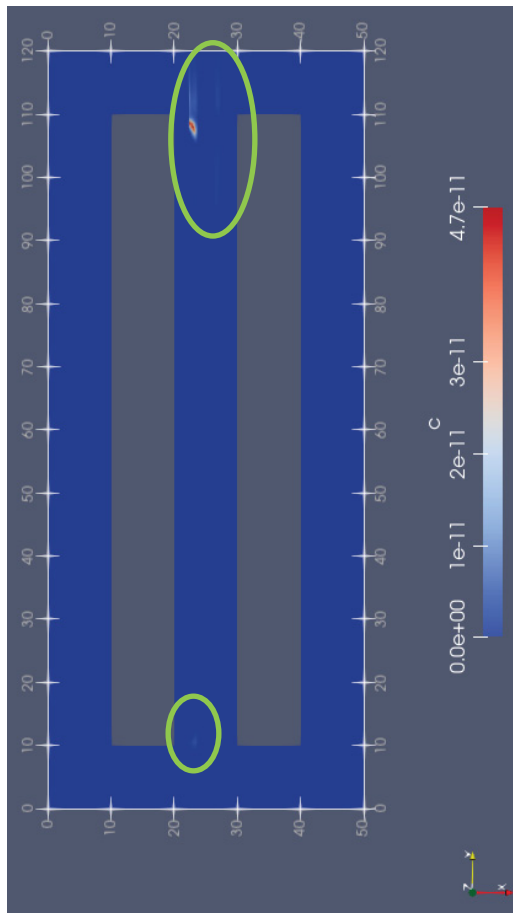
Sem árvores - U = (0;1;0)



Com árvores - U = (0;1;0)



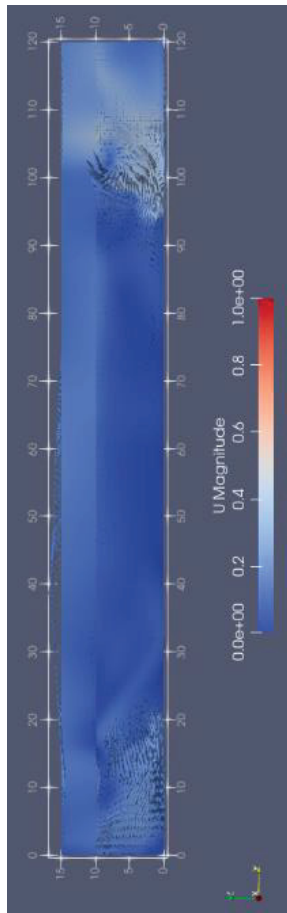
Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



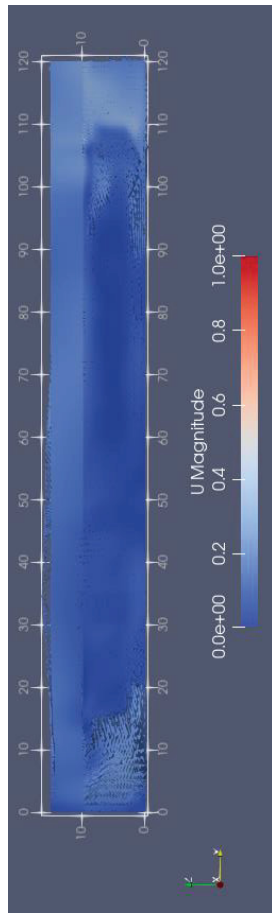
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

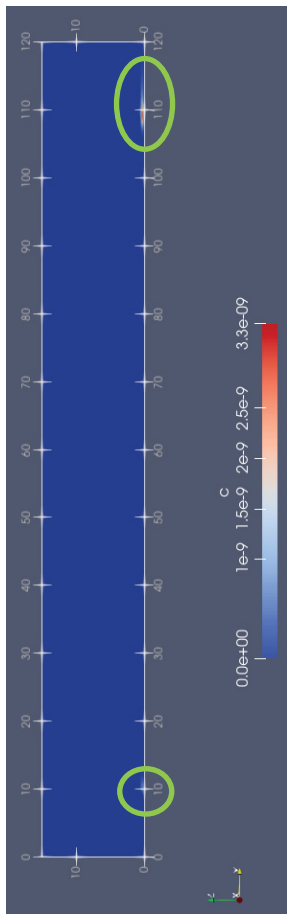
FIGURA 32 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



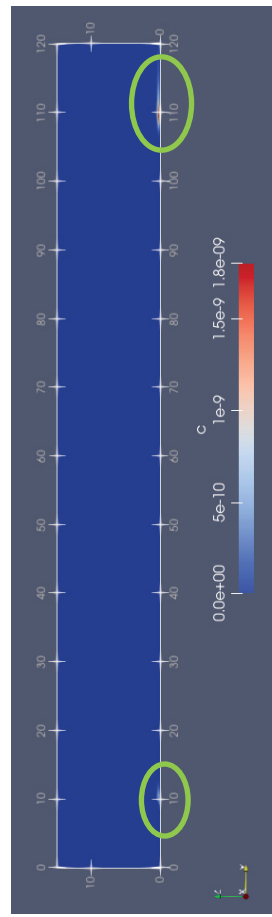
Sem árvores - U = (0;1;0)



Com árvores - U = (0;1;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua

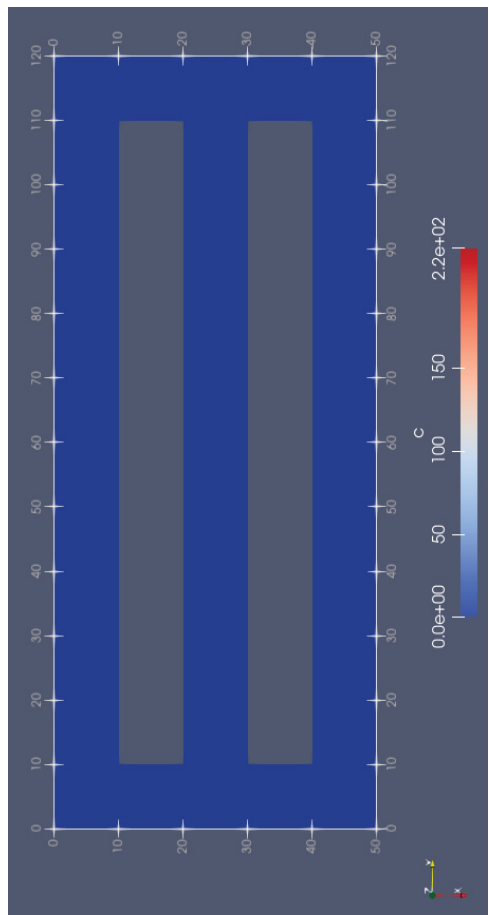
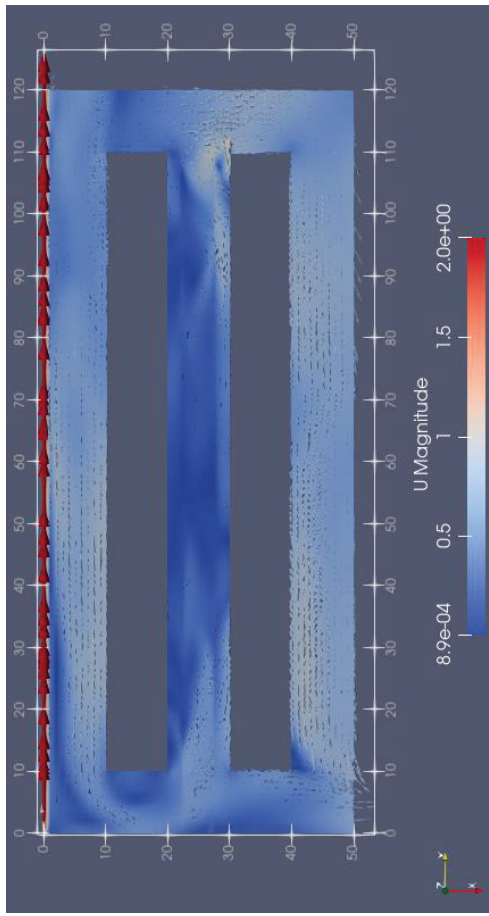


Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

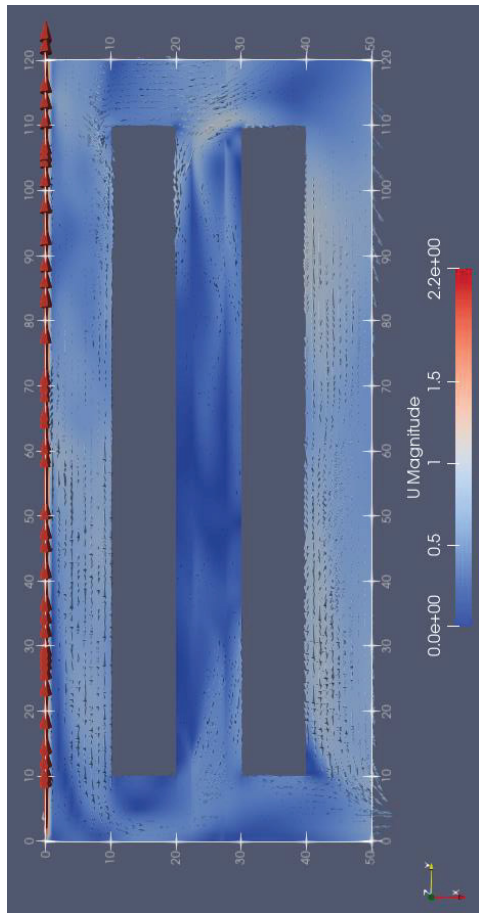
FONTE: A autora (2023).



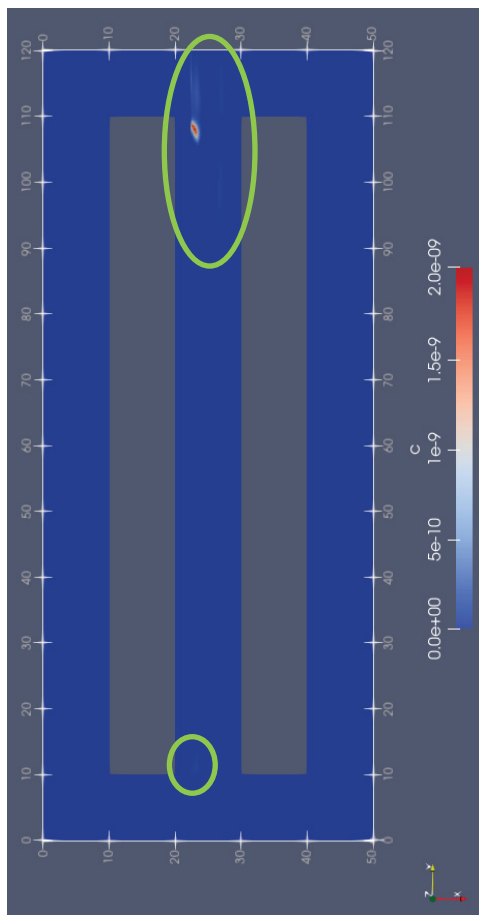
FIGURA 33 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;2;0) - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



Sem árvores - U = (0;2;0)



Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

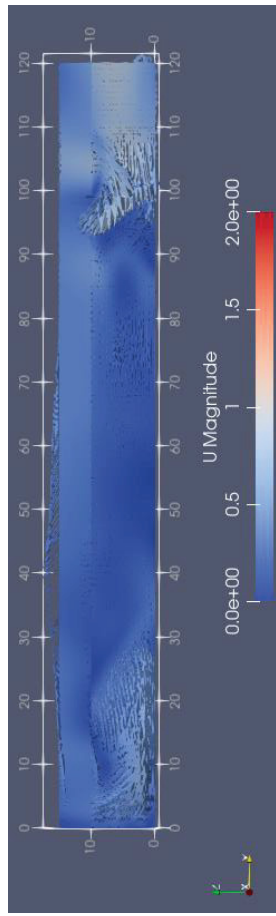


Com árvores - U = (0;2;0)

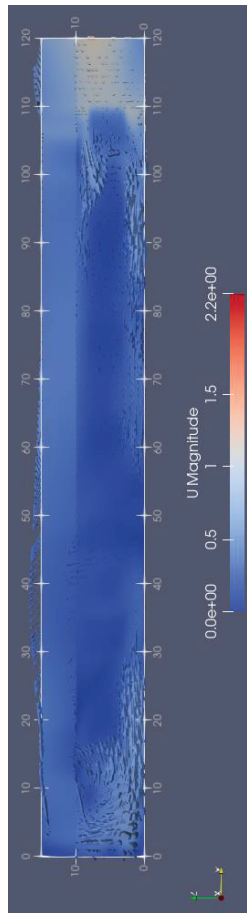
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

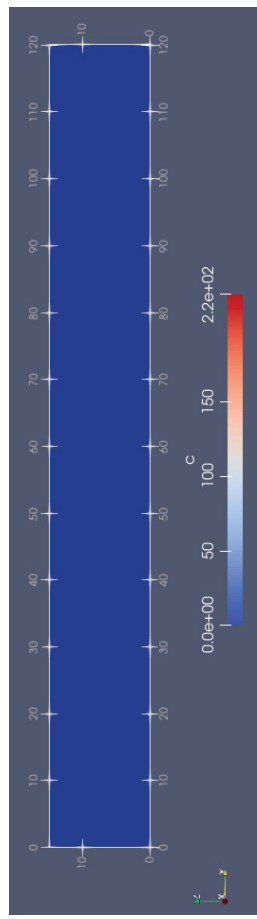
FIGURA 34 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;2;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



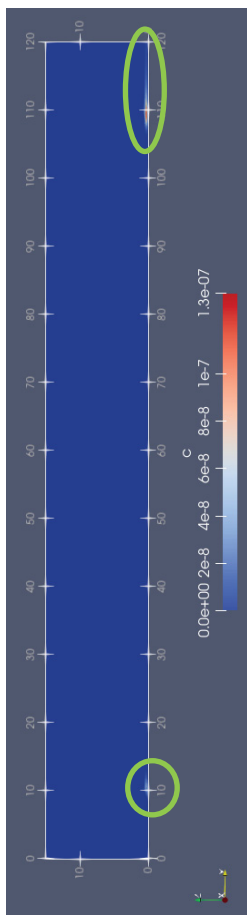
Sem árvores - U = (0;2;0)



Com árvores - U = (0;2;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

Nas seções longitudinais efetuadas no meio da rua entre 0 m e 15 m de altura (FIGURAS 30, 32 e 34), notou-se que o poluente também ficou próximo do final da rua e da altura de lançamento do mesmo pelo escapamento do veículo, assim como verificado por Buccolieri *et al.* (2009). Nos perfis de velocidade do vento foi possível observar a formação dos redemoinhos nessa região devido a entrada de poluentes pelos cantos da rua, explicando o aparecimento das concentrações nessas áreas, diferentemente do observado nas simulações perpendiculares onde as concentrações estavam dispersas ao longo da rua. Ressalta-se que esse resultado foi obtido a partir da entrada do vento estipulada neste trabalho, pois poderiam ter sido obtidos resultados diferentes dependendo do local de entrada.

Na TABELA 6 são apresentados os resultados obtidos das seções longitudinais em diferentes alturas para direção do vento paralela ( $0^\circ$ ) ao eixo principal da rua.

Foram verificadas reduções de até 50,35% (TABELA 4) nas concentrações de poluentes efetuadas nas seções longitudinais no meio da rua na presença de árvores, entretanto para as seções transversais na altura de 1,65 m (altura de respiração do pedestre) foi observado aumento de até 75,96% da concentração média ( $1,925 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para velocidade inicial de 1,00 m/s, porém essa é inferior a concentração média verificada nas seções longitudinais ( $0,194 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e não há valores de referência da OMS (2021) para comparação se essa concentração pode causar algum risco à saúde humana.

Os resultados da TABELA 6 mostraram que a inserção de árvores contribuiu para redução da concentração dos poluentes em todas alturas e velocidades simuladas. Analisando as FIGURAS 29, 31 e 33 foi possível observar que as concentrações mais elevadas ficaram predominantemente do lado a barlavento dos prédios do que na região central da rua, entretanto, também são verificadas concentrações mais baixas a sotavento, explicando essa diferença de resultados.

Vardoulakis *et al.* (2003) verificaram concentrações mais altas a sotavento do que a barlavento, porém há diferenças no modelo e na geometria utilizada. Já Bender e Dziejic (2012) observaram concentrações mais altas a barlavento do que a sotavento, pois deve ser levado em conta a direção do vento e as condições das simulações.

TABELA 6 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE CO<sub>2</sub>: PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (0°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS

U inicial (m/s)	Altura (m)	Sem árvores			Com árvores			Variação da C média (%)	
		U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )		
0,100	1,000	0,011	4,280x10 <sup>-22</sup>	4,280x10 <sup>-13</sup>	0,014	9,440x10 <sup>-26</sup>	9,440x10 <sup>-17</sup>	-99,978	
	1,500	0,011	8,570x10 <sup>-29</sup>	8,570x10 <sup>-20</sup>	0,008	1,890x10 <sup>-29</sup>	1,890x10 <sup>-20</sup>	-77,946	
	1,650	0,011	3,270x10 <sup>-32</sup>	3,270x10 <sup>-23</sup>	0,023	0,000	0,000	-100,000	
	2,000	0,011	1,160x10 <sup>-35</sup>	1,160x10 <sup>-26</sup>	0,013	0,000	0,000	-100,000	
	3,000	0,011	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	
	4,000	0,011	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	
	10,000	0,012	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	
	1,000	1,000	0,120	1,370x10 <sup>-14</sup>	1,370x10 <sup>-5</sup>	0,109	1,360x10 <sup>-15</sup>	1,360x10 <sup>-6</sup>	-90,073
		1,500	0,104	3,380x10 <sup>-18</sup>	3,380x10 <sup>-9</sup>	0,106	3,940x10 <sup>-20</sup>	3,940x10 <sup>-11</sup>	-98,834
		1,650	0,188	4,160x10 <sup>-19</sup>	4,160x10 <sup>-10</sup>	0,102	1,580x10 <sup>-22</sup>	1,580x10 <sup>-13</sup>	-99,962
2,000		0,119	7,130x10 <sup>-21</sup>	7,130x10 <sup>-12</sup>	0,098	6,300x10 <sup>-25</sup>	6,300x10 <sup>-16</sup>	-99,991	
3,000		0,051	1,170x10 <sup>-30</sup>	1,170x10 <sup>-21</sup>	0,078	3,950x10 <sup>-32</sup>	3,950x10 <sup>-23</sup>	-96,624	
4,000		0,055	8,470x10 <sup>-37</sup>	8,470x10 <sup>-28</sup>	0,069	3,370x10 <sup>-37</sup>	3,370x10 <sup>-28</sup>	-60,213	
10,000		0,099	0,000	0,000	0,141	0,000	0,000	0,000	
2,000		1,000	0,286	6,000x10 <sup>-12</sup>	0,006	0,353	1,000x10 <sup>-12</sup>	0,001	-83,333
		1,500	0,294	1,550x10 <sup>-15</sup>	1,550x10 <sup>-6</sup>	0,353	1,160x10 <sup>-16</sup>	1,160x10 <sup>-7</sup>	-92,516
		1,650	0,296	2,400x10 <sup>-17</sup>	2,400x10 <sup>-8</sup>	0,346	1,200x10 <sup>-18</sup>	1,200x10 <sup>-9</sup>	-95,000
	2,000	0,296	3,500x10 <sup>-19</sup>	3,500x10 <sup>-10</sup>	0,333	1,180x10 <sup>-20</sup>	1,180x10 <sup>-11</sup>	-96,629	
	3,000	0,291	7,220x10 <sup>-25</sup>	7,220x10 <sup>-16</sup>	0,258	1,050x10 <sup>-26</sup>	1,050x10 <sup>-17</sup>	-98,546	
	4,000	0,289	4,140x10 <sup>-29</sup>	4,140x10 <sup>-20</sup>	0,212	5,310x10 <sup>-31</sup>	5,310x10 <sup>-22</sup>	-98,717	
	10,000	0,311	0,000	0,000	0,324	0,000	0,000	0,000	

FONTE: A autora (2023).

#### 4.2.2 Resultados das simulações de MP<sub>2,5</sub>

O MP foi escolhido devido a ser um dos poluentes mais prejudiciais à saúde humana (BASIŃSKA *et al.*, 2021) e a fração fina (2,5 micrômetros) ser mais nociva à saúde do que as frações mais grossas (10,0 micrômetros), de acordo com YI *et al.* (2020). Conforme verificado nas simulações de CO<sub>2</sub>, o modelo apresentou limitações na entrada de velocidade do vento e avaliação de apenas uma geometria.

Os resultados obtidos nas simulações de MP<sub>2,5</sub> para as seções no meio da rua são apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP<sub>2,5</sub>

Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Velocidade média (m/s)	Concentração média de poluentes		Presença de Árvores
			(kg/m <sup>3</sup> )	(µg/m <sup>3</sup> )	
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção longitudinal no meio da rua	(0,1;0;0)	0,038	7,666x10 <sup>-21</sup>	7,666x10 <sup>-13</sup>	Não
	(0,1;0;0)	0,036	7,599x10 <sup>-21</sup>	7,599x10 <sup>-13</sup>	Sim
	(1;0;0)	0,650	6,238x10 <sup>-15</sup>	6,238x10 <sup>-7</sup>	Não
	(1;0;0)	0,524	6,548x10 <sup>-15</sup>	6,548x10 <sup>-7</sup>	Sim
	(2;0;0)	1,360	1,059x10 <sup>-14</sup>	1,059x10 <sup>-5</sup>	Não
	(2;0;0)	1,090	1,091x10 <sup>-14</sup>	1,091x10 <sup>-5</sup>	Sim
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	(0,1;0;0)	0,041	5,958x10 <sup>-26</sup>	5,958x10 <sup>-17</sup>	Não
	(0,1;0;0)	0,041	5,544x10 <sup>-26</sup>	5,544x10 <sup>-17</sup>	Sim
	(1;0;0)	0,748	1,537x10 <sup>-17</sup>	1,537x10 <sup>-8</sup>	Não
	(1;0;0)	0,744	1,645x10 <sup>-17</sup>	1,645x10 <sup>-8</sup>	Sim
	(2;0;0)	1,526	2,100x10 <sup>-16</sup>	2,100x10 <sup>-7</sup>	Não
	(2;0;0)	1,458	1,547x10 <sup>-16</sup>	1,547x10 <sup>-7</sup>	Sim
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção longitudinal no meio da rua	(0;0,1;0)	0,012	6,434x10 <sup>-27</sup>	6,434x10 <sup>-19</sup>	Não
	(0;0,1;0)	0,010	4,667x10 <sup>-27</sup>	4,667x10 <sup>-19</sup>	Sim
	(0;1;0)	0,116	2,945x10 <sup>-22</sup>	2,945x10 <sup>-13</sup>	Não
	(0;1;0)	0,093	1,702x10 <sup>-22</sup>	1,702x10 <sup>-13</sup>	Sim
	(0;2;0)	0,285	1,475x10 <sup>-20</sup>	1,475x10 <sup>-11</sup>	Não
	(0;2;0)	0,274	9,067x10 <sup>-20</sup>	9,067x10 <sup>-12</sup>	Sim
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	(0;0,1;0)	0,012	1,419x10 <sup>-28</sup>	1,419x10 <sup>-19</sup>	Não
	(0;0,1;0)	0,013	1,296x10 <sup>-28</sup>	1,296x10 <sup>-19</sup>	Sim
	(0;1;0)	0,161	4,860x10 <sup>-23</sup>	4,860x10 <sup>-15</sup>	Não
	(0;1;0)	0,157	8,691x10 <sup>-23</sup>	8,691x10 <sup>-15</sup>	Sim
	(0;2;0)	0,357	2,202x10 <sup>-22</sup>	2,202x10 <sup>-13</sup>	Não
	(0;2;0)	0,381	3,294x10 <sup>-22</sup>	3,294x10 <sup>-13</sup>	Sim

FONTE: A autora (2023).

Na TABELA 8 encontram-se as variações das concentrações obtidas com a inclusão de árvores nas simulações.

TABELA 8 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MP<sub>2,5</sub> NA PRESENÇA DE ÁRVORES

Direção do vento	Velocidade inicial (m/s)	Varição da concentração de poluentes (%)
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção longitudinal no meio da rua	0,10	-0,88
	1,00	4,97
	2,00	3,10
Perpendicular ao eixo principal da rua (90°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	0,10	-6,94
	1,00	7,03
	2,00	-26,33
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção longitudinal no meio da rua	0,10	-27,46
	1,00	-42,22
	2,00	-38,51
Paralelo ao eixo principal da rua (0°) - Seção transversal em 1,65 m de altura	0,10	-8,67
	1,00	78,83
	2,00	49,59

FONTE: A autora (2023).

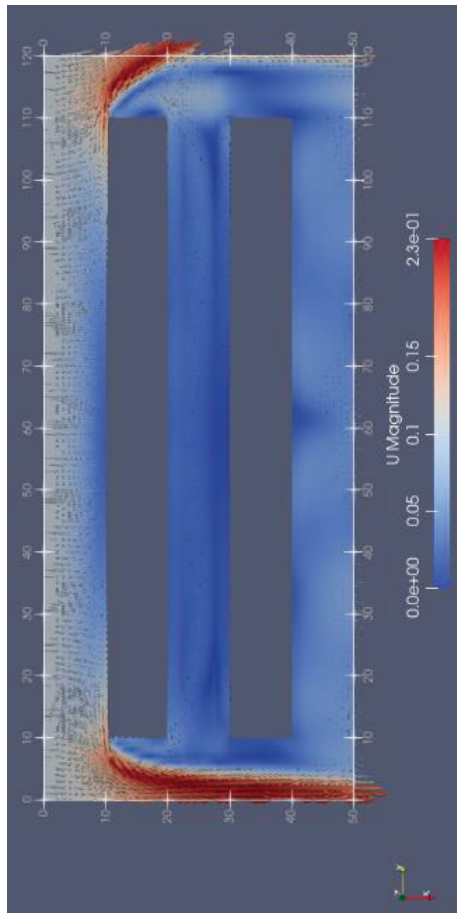
As FIGURAS 35 a 40 apresentam os perfis de velocidade e de concentração de MP<sub>2,5</sub> para ventos incidentes perpendiculares com velocidade inicial de 0,10 m/s, 1,00 m/s e 2,00 m/s, incluindo o cenário com e sem árvores na seção longitudinal no meio da rua e transversal em 1,65 m de altura.

Nas simulações realizadas para ventos incidentes perpendiculares foram verificadas semelhanças no perfil de concentração tanto na presença quanto na ausência de árvores, conforme observado nas FIGURAS 35 a 40, bem como valores de redução ou aumento nas concentrações, sendo máximo de 26,33% de redução para velocidade inicial de 2,00 m/s (TABELA 8). Zavala-Reyes *et al.* (2019) também observaram que para velocidades mais altas há maior redução das concentrações de MP<sub>2,5</sub> e NO<sub>x</sub>, pois obtiveram até 45% de redução ao dobrar a velocidade de 2,00 m/s para 4,00 m/s.

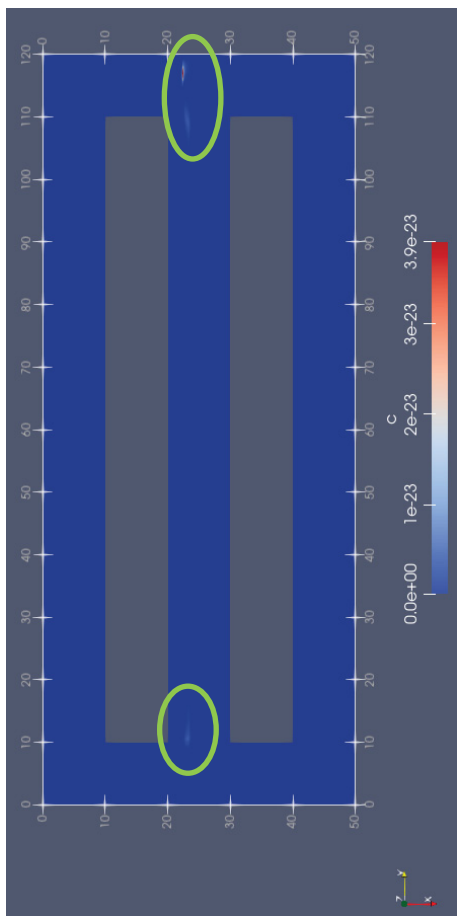
Nas seções longitudinais efetuadas no meio da rua entre 0 m e 15 m na simulação com árvores para a velocidade inicial de 1,00 m/s (FIGURA 38) e 2,00 m/s (FIGURA 40), foi possível verificar facilmente os campos de velocidade do vento, pois a velocidade reduziu ao passar pelas árvores e aumentou novamente quando não havia uma árvore, assim ao chegar no final da rua o vento se dispersou e empurrou o contaminante para o final da área avaliada.

A seguir são apresentados os resultados obtidos das seções longitudinais em diferentes alturas, sendo verificado na TABELA 9 os valores para direção do vento perpendicular ao eixo principal da rua (90°).

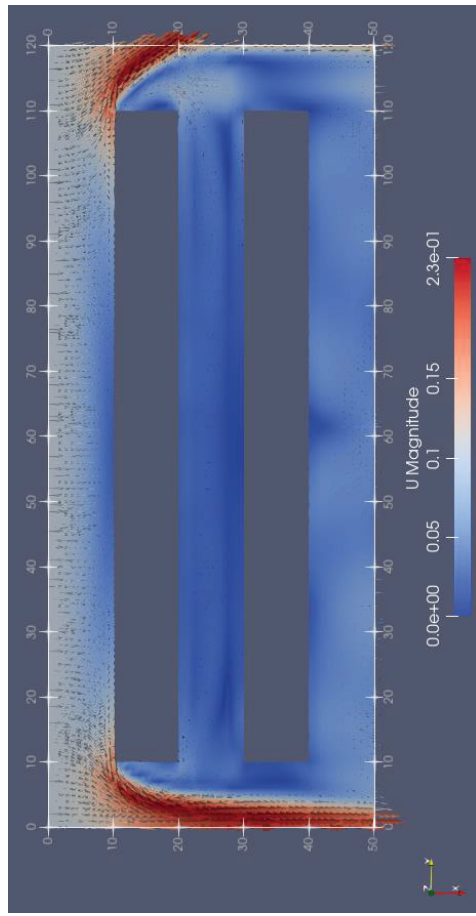
FIGURA 35 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES  $U = (0, 1; 0; 0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



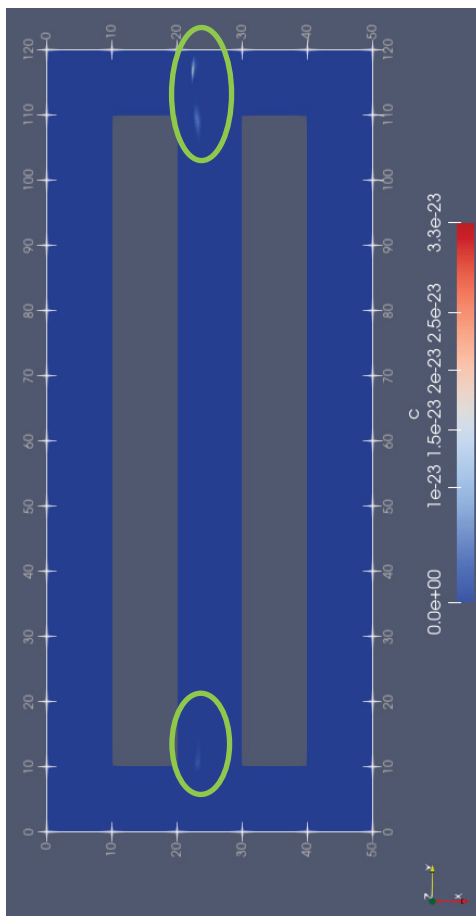
Sem árvores -  $U = (0, 1; 0; 0)$



Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



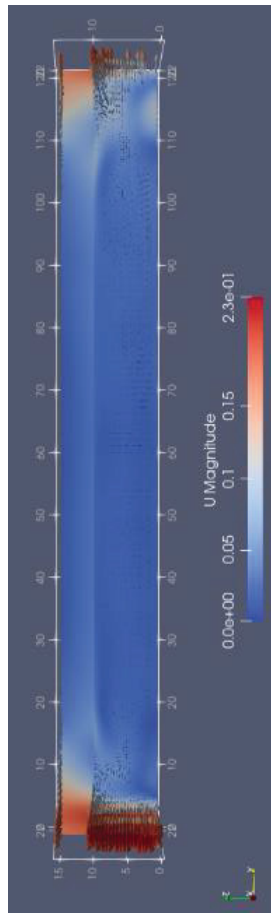
Com árvores -  $U = (0, 1; 0; 0)$



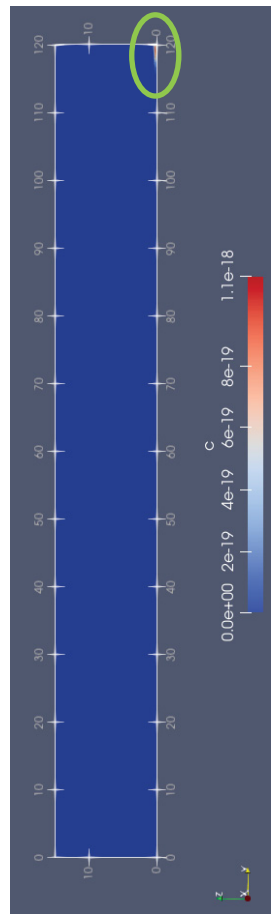
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

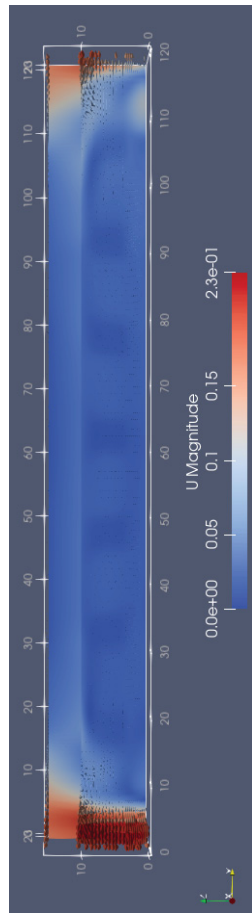
FIGURA 36 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP<sub>2.5</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES U = (0,1;0;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



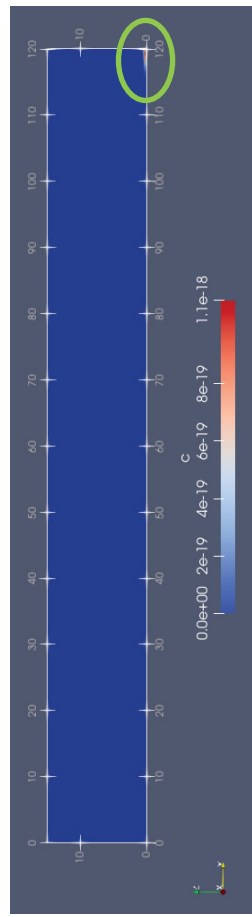
Sem árvores - U = (0,1;0;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - U = (0,1;0;0)

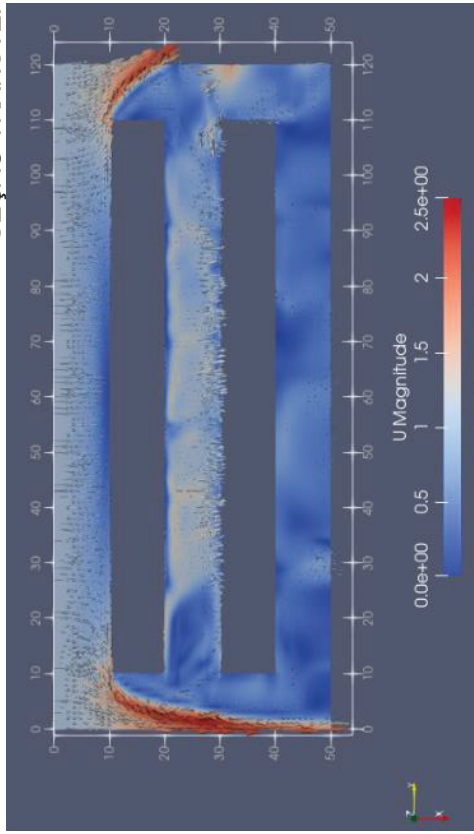


Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

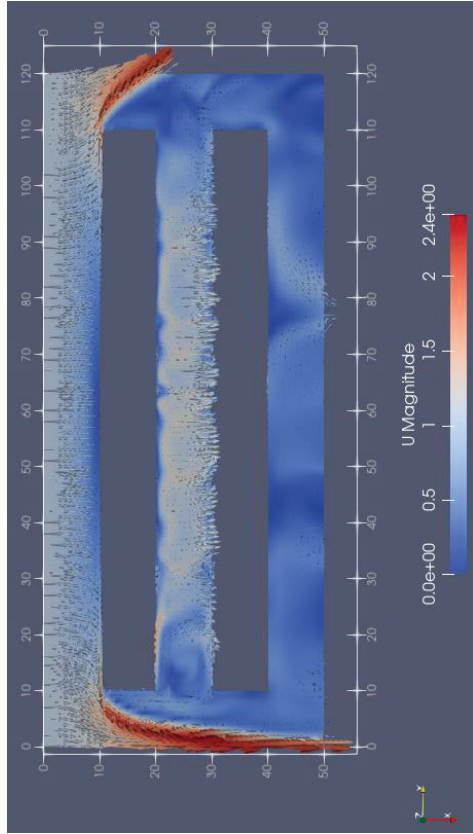
FONTE: A autora (2023).



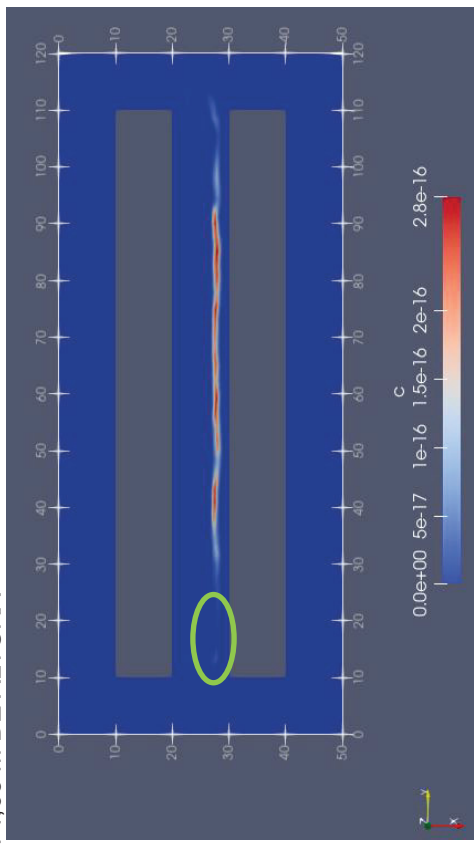
FIGURA 37 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES  $U = (1;0;0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



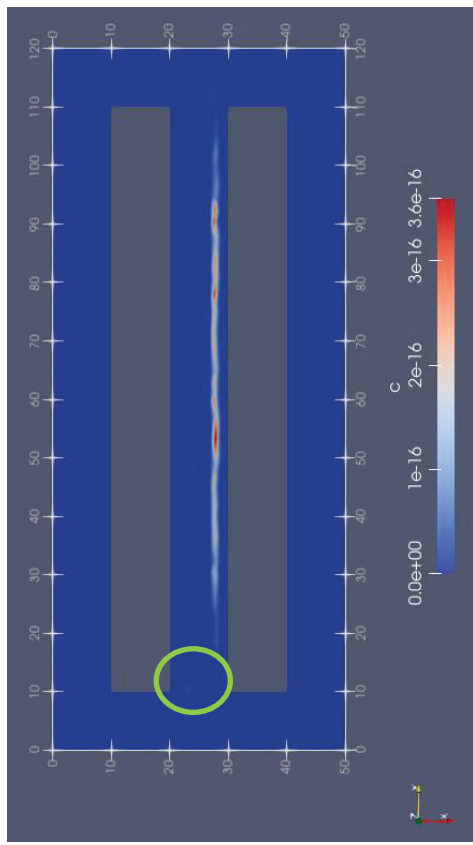
Sem árvores -  $U = (1;0;0)$



Com árvores -  $U = (1;0;0)$



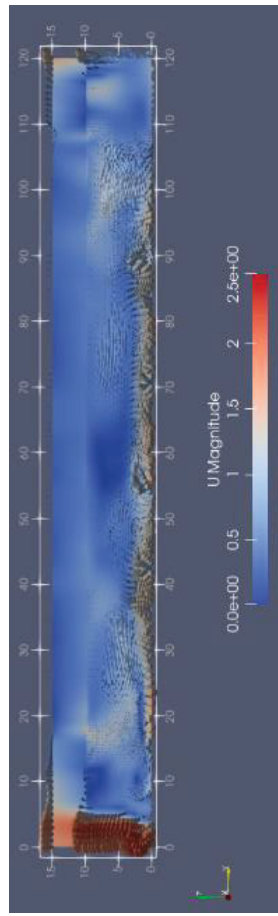
Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



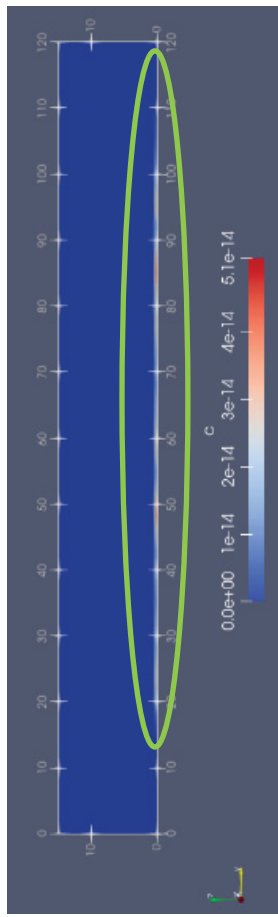
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

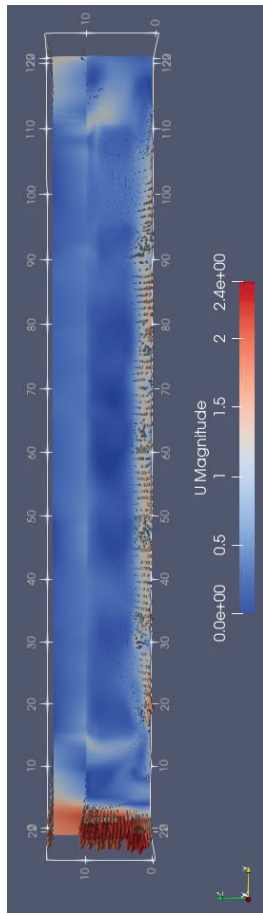
FIGURA 38 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES  $U = (1;0;0)$  - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



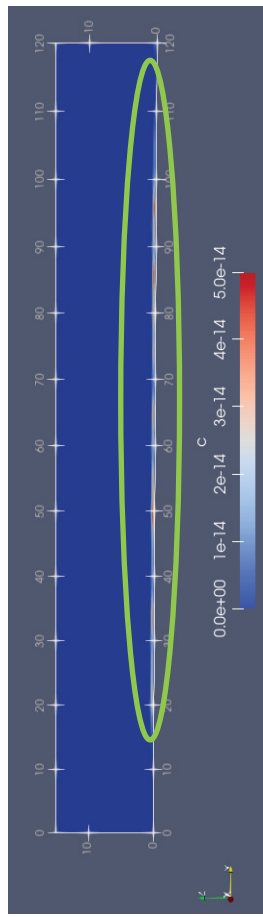
Sem árvores -  $U = (1;0;0)$



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



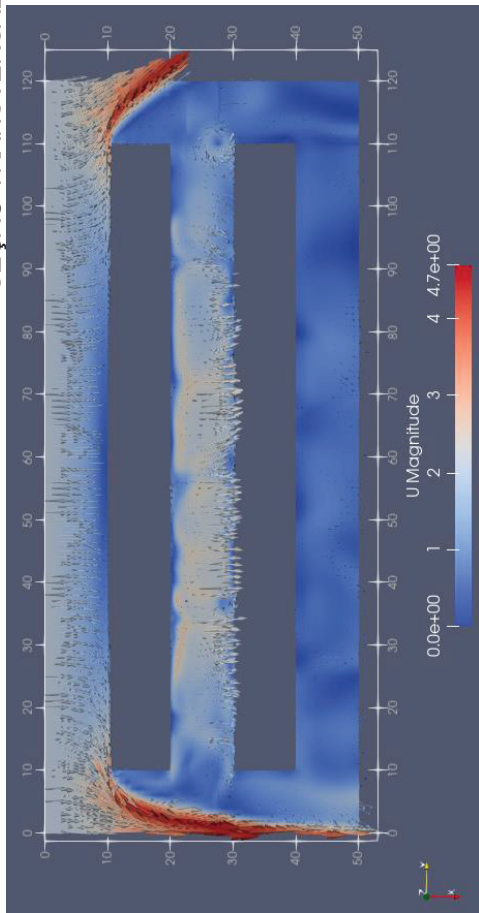
Com árvores -  $U = (1;0;0)$



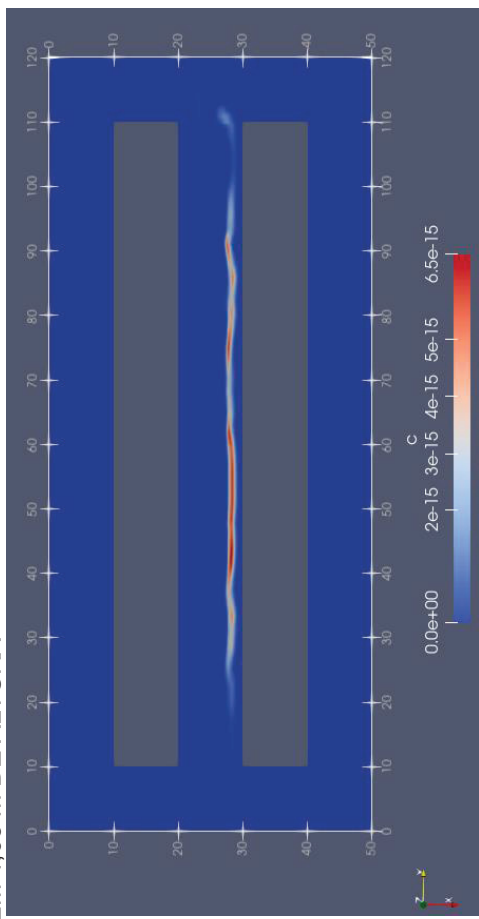
Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

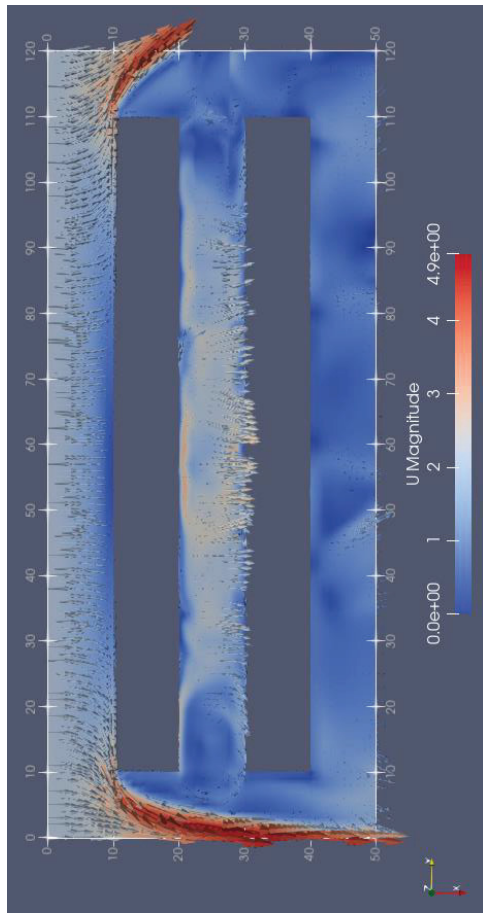
FIGURA 39 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES  $U = (2;0;0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



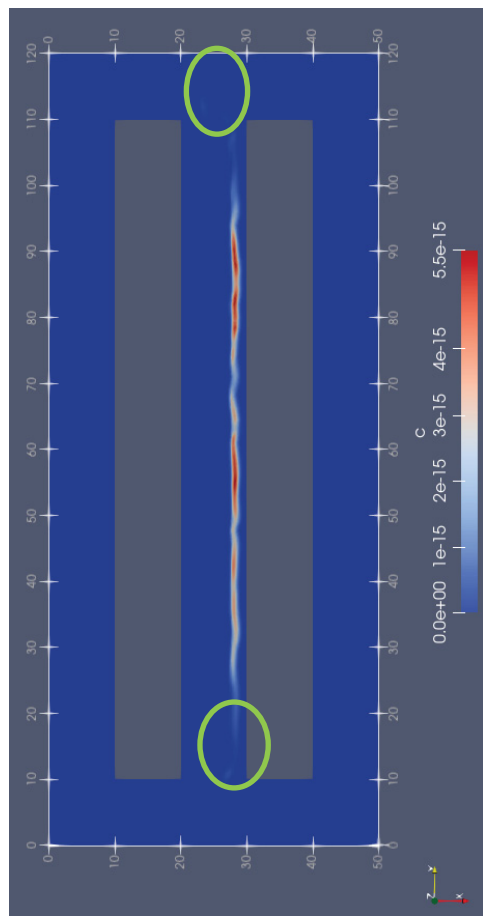
Sem árvores -  $U = (2;0;0)$



Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



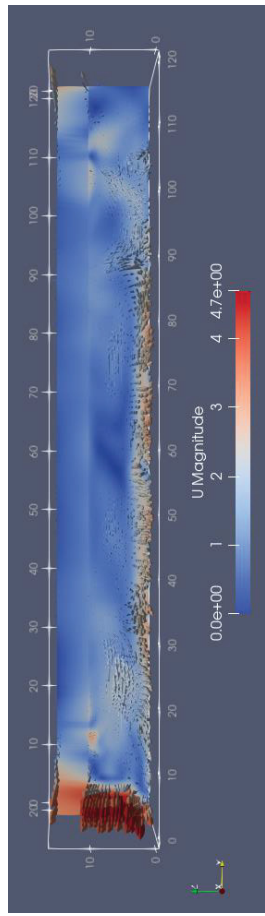
Com árvores -  $U = (2;0;0)$



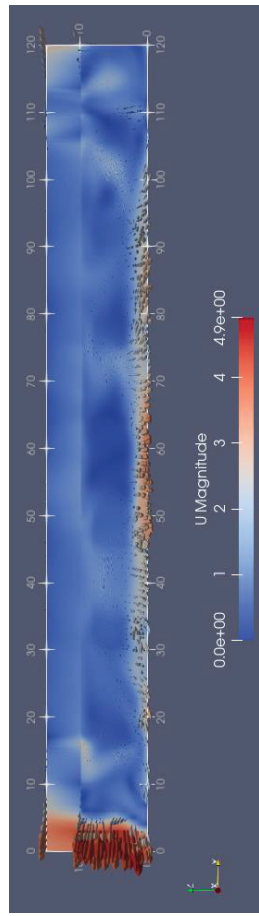
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

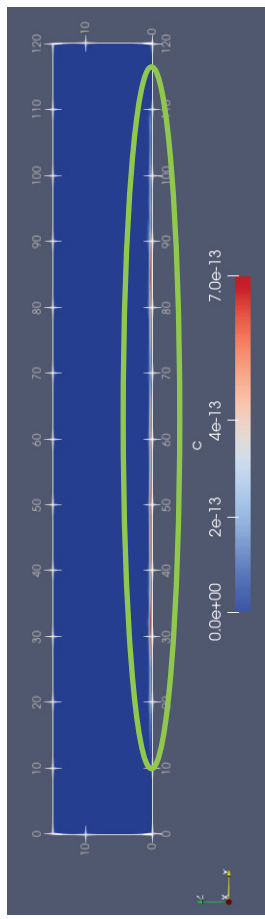
FIGURA 40 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PERPENDICULARES  $U = (2;0;0)$  - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



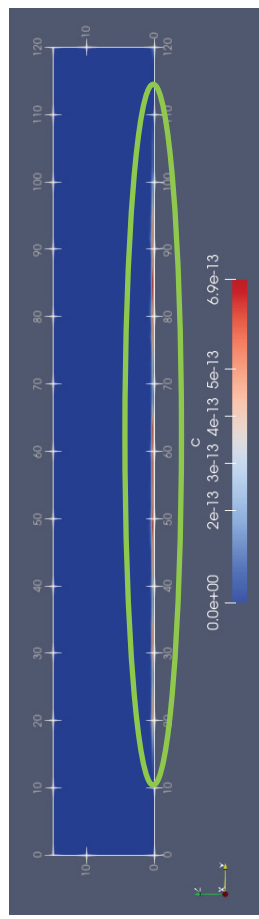
Sem árvores -  $U = (2;0;0)$



Com árvores -  $U = (2;0;0)$



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

TABELA 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP<sub>2,5</sub>: PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (90°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS

U inicial (m/s)	Altura (m)	Sem árvores			Com árvores			Variação da C média (%)
		U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	
0,100	1,000	0,026	1,950x10 <sup>-26</sup>	1,950x10 <sup>-17</sup>	0,032	1,500x10 <sup>-26</sup>	1,500x10 <sup>-17</sup>	-23,077
	1,500	0,052	1,210x10 <sup>-32</sup>	1,210x10 <sup>-23</sup>	0,038	1,030x10 <sup>-35</sup>	1,030x10 <sup>-26</sup>	-99,915
	1,650	0,041	5,958x10 <sup>-25</sup>	5,958x10 <sup>-16</sup>	0,041	5,544x10 <sup>-25</sup>	5,544x10 <sup>-16</sup>	-6,949
	2,000	0,020	0,000	0,000	0,115	0,000	0,000	0,000
	3,000	0,068	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000
1,000	4,000	0,075	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000
	10,000	0,113	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,000
	1,000	1,061	1,270x10 <sup>-16</sup>	1,270x10 <sup>-7</sup>	0,820	6,420x10 <sup>-17</sup>	6,420x10 <sup>-8</sup>	-49,449
	1,500	0,991	6,650x10 <sup>-18</sup>	6,650x10 <sup>-9</sup>	1,017	4,400x10 <sup>-21</sup>	4,400x10 <sup>-12</sup>	-99,934
	1,650	0,857	2,410x10 <sup>-18</sup>	2,410x10 <sup>-9</sup>	1,532	1,700x10 <sup>-21</sup>	1,700x10 <sup>-12</sup>	-99,929
2,000	2,000	0,785	2,320x10 <sup>-19</sup>	2,320x10 <sup>-10</sup>	0,757	5,580x10 <sup>-23</sup>	5,580x10 <sup>-14</sup>	-99,976
	3,000	0,647	2,940x10 <sup>-26</sup>	2,940x10 <sup>-17</sup>	0,487	1,140x10 <sup>-30</sup>	1,140x10 <sup>-21</sup>	-99,996
	4,000	0,650	1,350x10 <sup>-35</sup>	1,350x10 <sup>-26</sup>	0,335	9,320x10 <sup>-36</sup>	9,320x10 <sup>-27</sup>	-30,963
	10,000	0,831	0,000	0,000	0,882	0,000	0,000	0,000
	1,000	2,050	5,320x10 <sup>-16</sup>	5,320x10 <sup>-7</sup>	1,927	5,260x10 <sup>-16</sup>	5,260x10 <sup>-7</sup>	-1,128
2,000	1,500	1,837	1,710x10 <sup>-18</sup>	1,710x10 <sup>-9</sup>	1,648	6,940x10 <sup>-19</sup>	6,940x10 <sup>-10</sup>	-59,415
	1,650	1,714	1,190x10 <sup>-19</sup>	1,190x10 <sup>-10</sup>	1,471	2,920x10 <sup>-20</sup>	2,920x10 <sup>-11</sup>	-75,462
	2,000	1,587	8,970x10 <sup>-21</sup>	8,970x10 <sup>-12</sup>	1,283	1,510x10 <sup>-21</sup>	1,510x10 <sup>-12</sup>	-83,166
	3,000	1,224	3,070x10 <sup>-24</sup>	3,070x10 <sup>-15</sup>	0,841	4,870x10 <sup>-25</sup>	4,870x10 <sup>-16</sup>	-84,137
	4,000	1,088	3,520x10 <sup>-27</sup>	3,520x10 <sup>-18</sup>	0,706	9,680x10 <sup>-28</sup>	9,680x10 <sup>-19</sup>	-72,500
10,000	1,269	0,000	0,000	1,099	0,000	0,000	0,000	

FONTE: A autora (2023).

Verificou-se que a concentração média aumentou em até 7,03% na presença das árvores para velocidade inicial de 1,00 m/s, na seção transversal efetuada na altura de 1,65 m (TABELA 8), indicando que as árvores podem ter funcionado como obstáculos e contribuíram para redução média da velocidade do vento de 0,748 m/s para 0,744 m/s (TABELA 7), acumulando o poluente embaixo delas, ou seja, evitando a dispersão do poluente, assim como verificado por Gromke e Ruck (2007).

Para os cenários avaliados na presença de árvores em diferentes alturas foram observadas apenas reduções nas concentrações de poluentes, sendo a maior de 99,996% na altura de 3,00 m para velocidade inicial de 1,00 m/s.

As FIGURAS 41 a 46 apresentam os perfis de velocidade e de concentração de  $MP_{2,5}$  para ventos incidentes paralelos com velocidade inicial de 0,10 m/s, 1,00 m/s e 2,00 m/s, incluindo o cenário com e sem árvores na seção longitudinal no meio da rua e transversal em 1,65 m de altura.

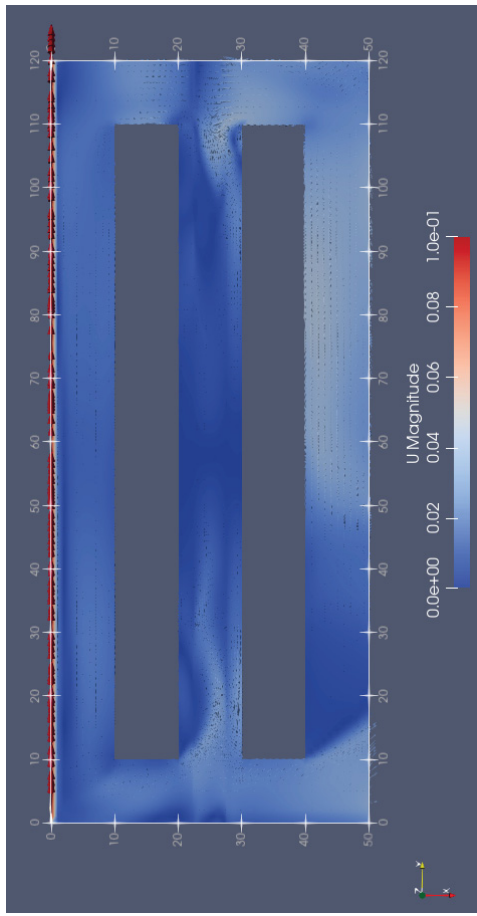
Nos cortes realizados na velocidade inicial de 0,10 m/s, 1,00 m/s e 2,00 m/s para ventos incidentes paralelos, observou-se que foram formados redemoinhos no início e no fim da rua devido à entrada e saída do vento o que contribuiu para o acúmulo de concentrações de poluentes nesses pontos.

Nas seções longitudinais no meio da rua de 0 a 15 m (FIGURAS 42, 44 e 46), foram observadas reduções de até 42,22% nas concentrações de poluentes para velocidade inicial de 1,00 m/s (TABELA 8), já para essa mesma velocidade na seção transversal em 1,65 m de altura foi observado aumento de até 78,83% na concentração de poluentes.

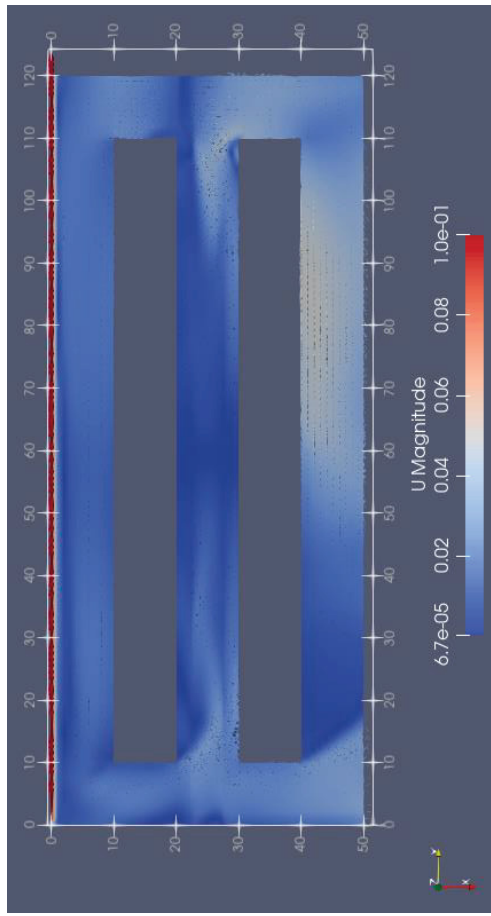
A TABELA 10 apresenta os resultados obtidos das seções longitudinais em diferentes alturas para direção paralela ( $0^\circ$ ) ao eixo principal da rua.

A avaliação das variações das concentrações no meio da rua em diferentes alturas (TABELA 10) também indicou reduções de até 100% na concentração de poluentes na altura de 4,00 m para velocidade inicial de 2,00 m/s.

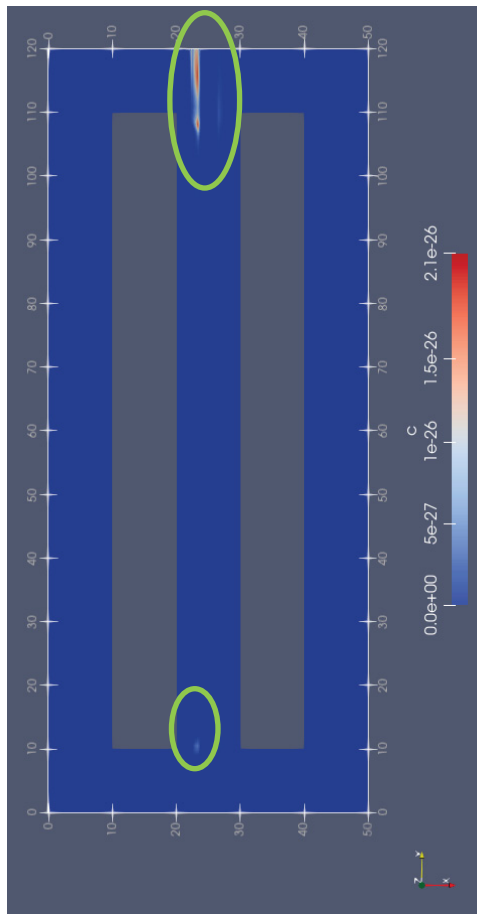
FIGURA 41 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS  $U = (0;0,1;0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



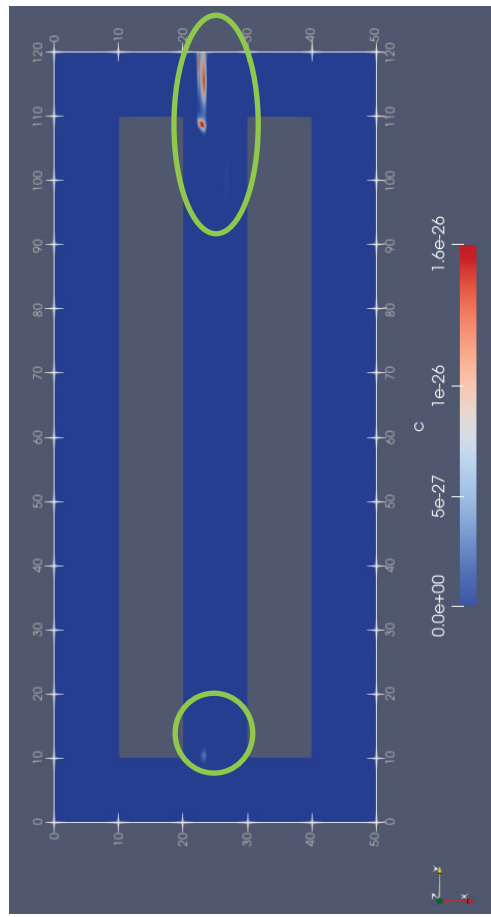
Sem árvores -  $U = (0;0,1;0)$



Com árvores -  $U = (0;0,1;0)$



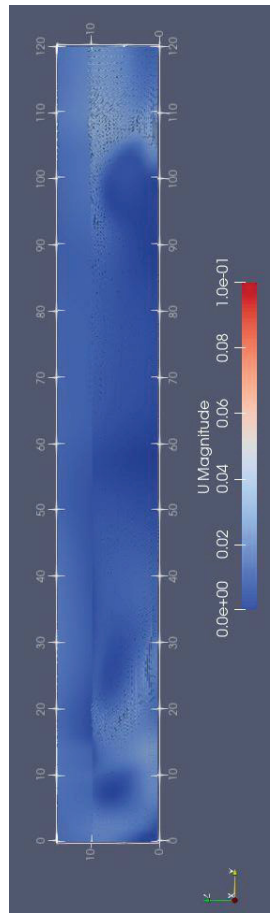
Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



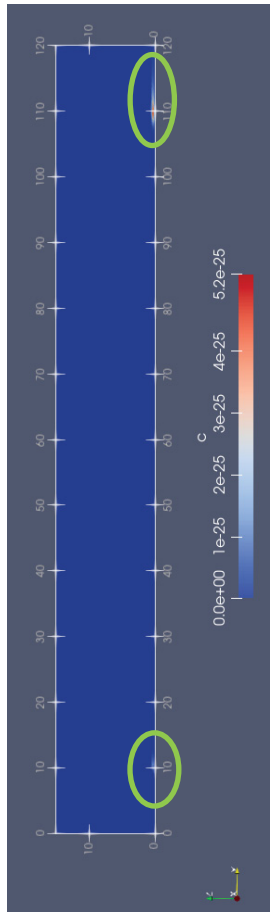
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

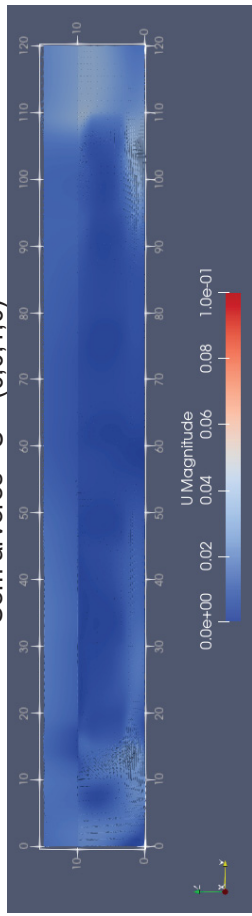
FIGURA 42 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP<sub>2.5</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;0,1;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



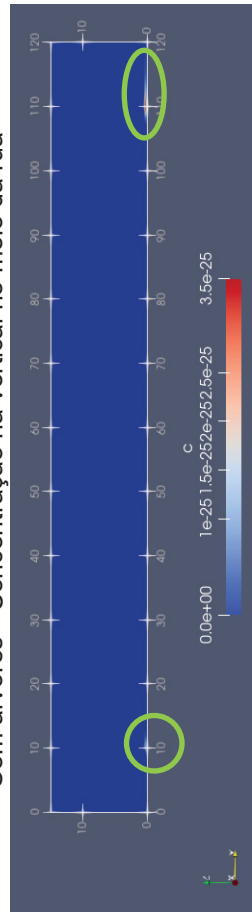
Sem árvores - U = (0;0,1;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - U = (0;0,1;0)

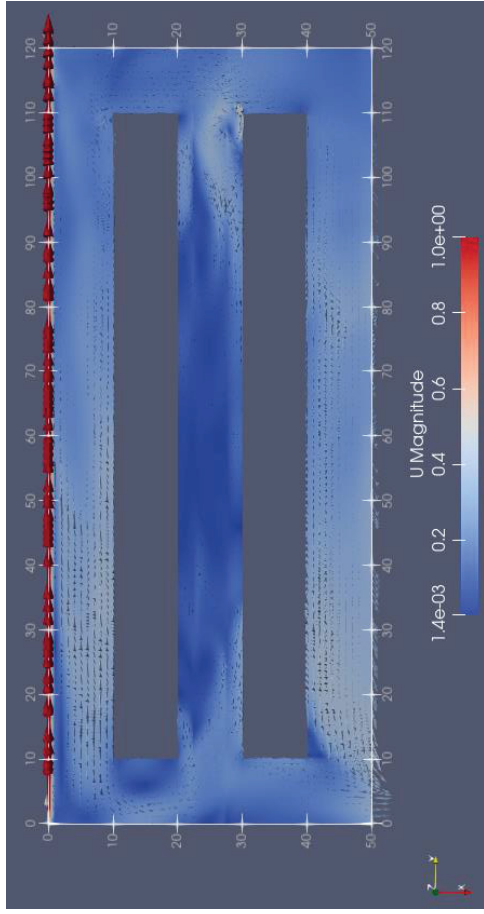


Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

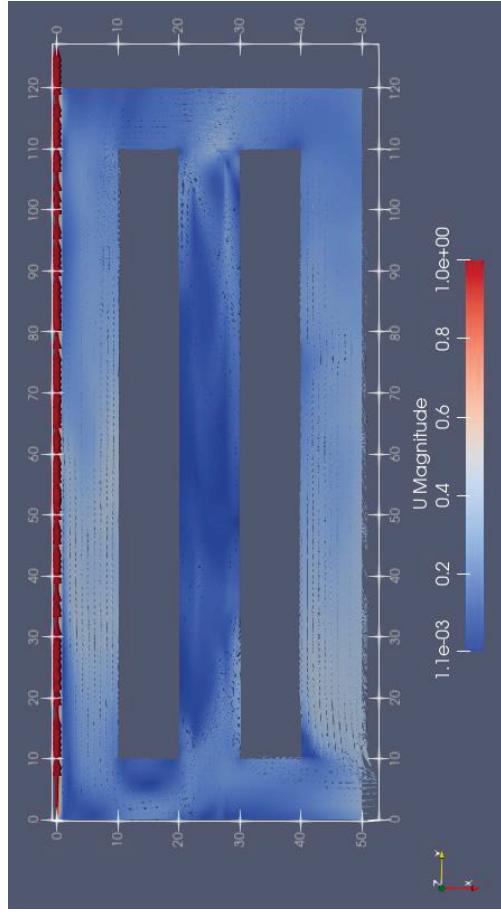
FONTE: A autora (2023).



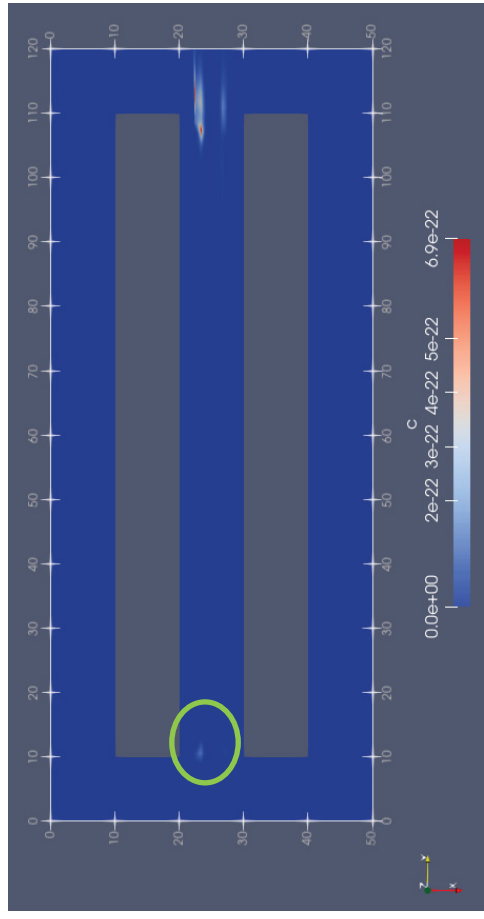
FIGURA 43 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2,5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS  $U = (0;1;0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



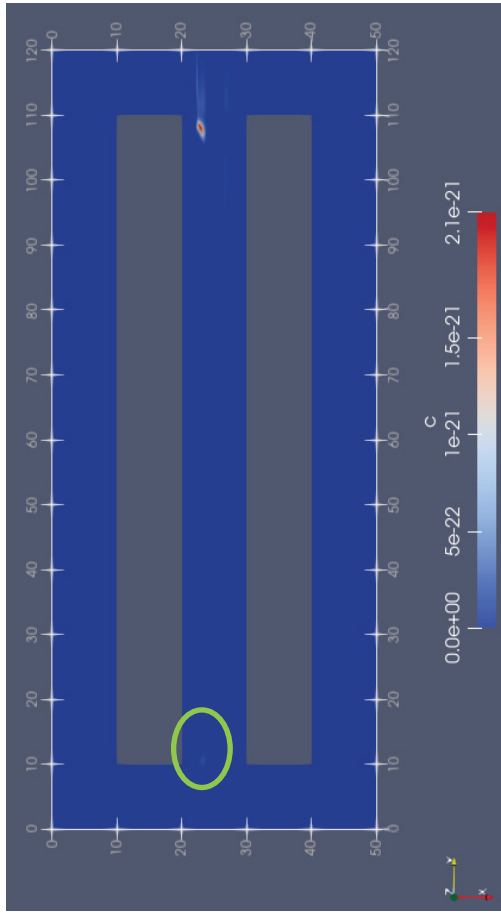
Sem árvores -  $U = (0;1;0)$



Com árvores -  $U = (0;1;0)$



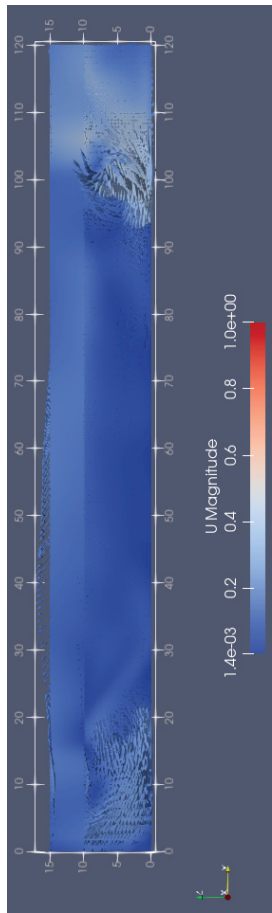
Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



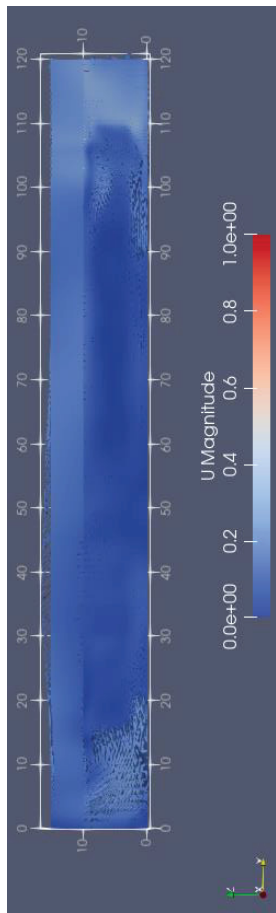
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

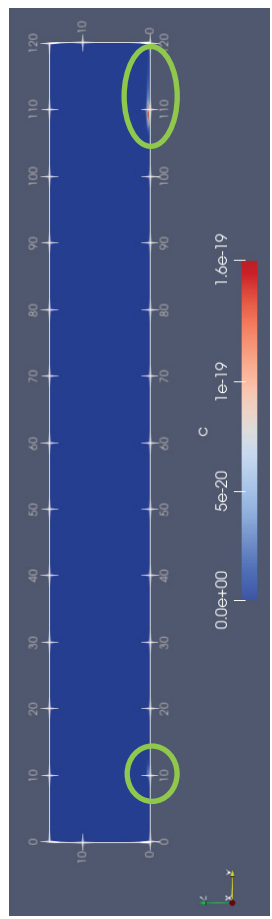
FIGURA 44 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS  $U = (0;1;0)$  - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



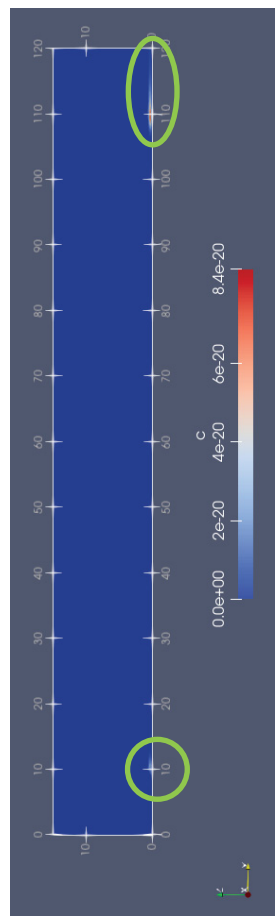
Sem árvores -  $U = (0;1;0)$



Com árvores -  $U = (0;1;0)$



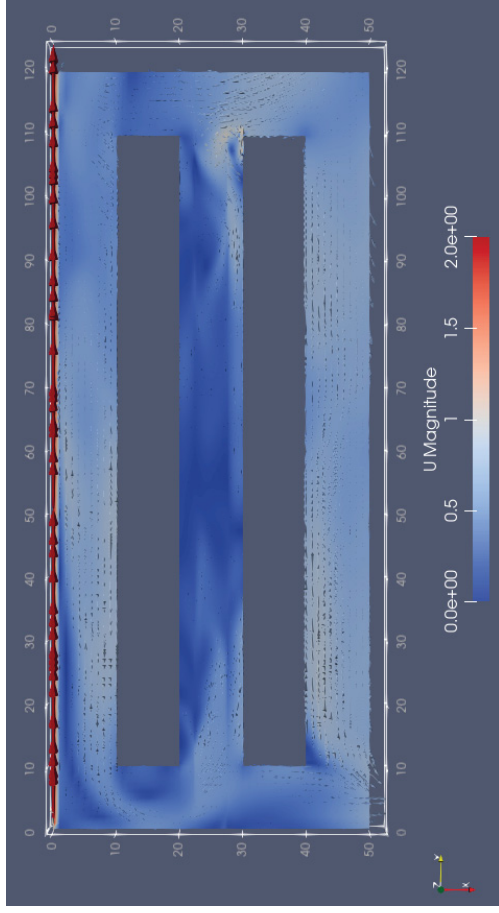
Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



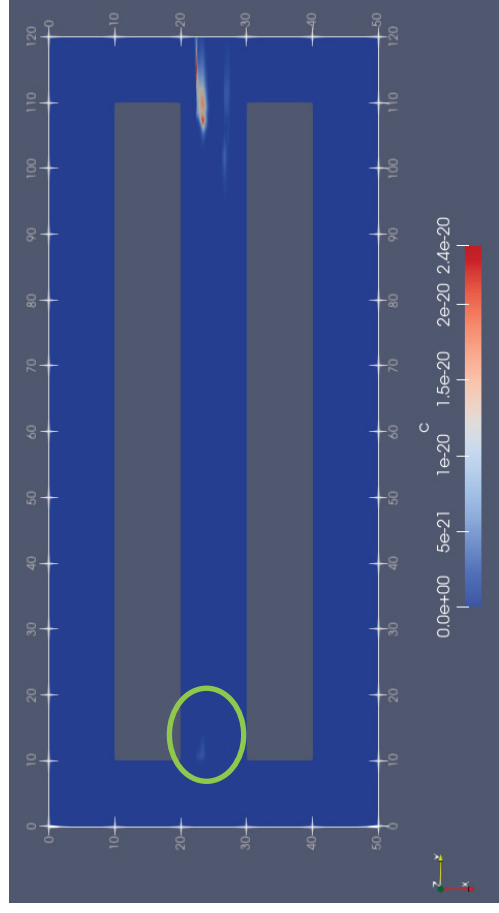
Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

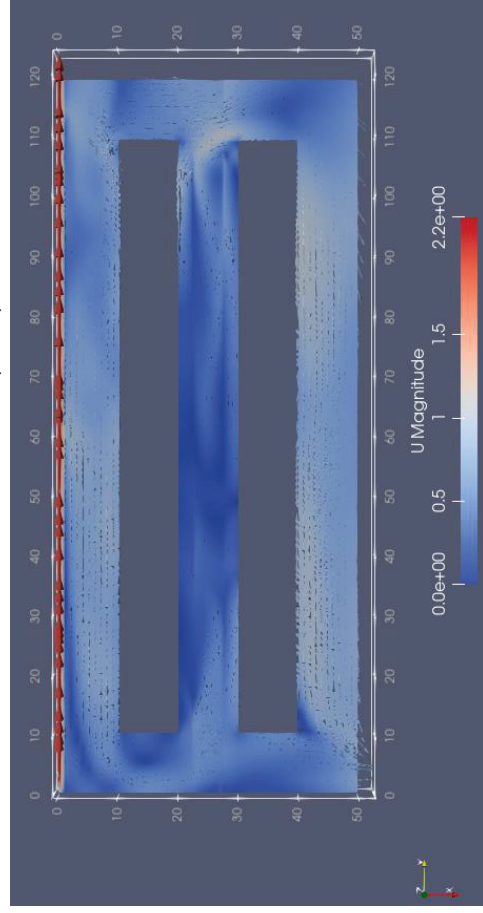
FIGURA 45 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2.5}$  ( $kg/m^3$ ) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS  $U = (0;2;0)$  - SEÇÃO TRANSVERSAL EM 1,65 m DE ALTURA



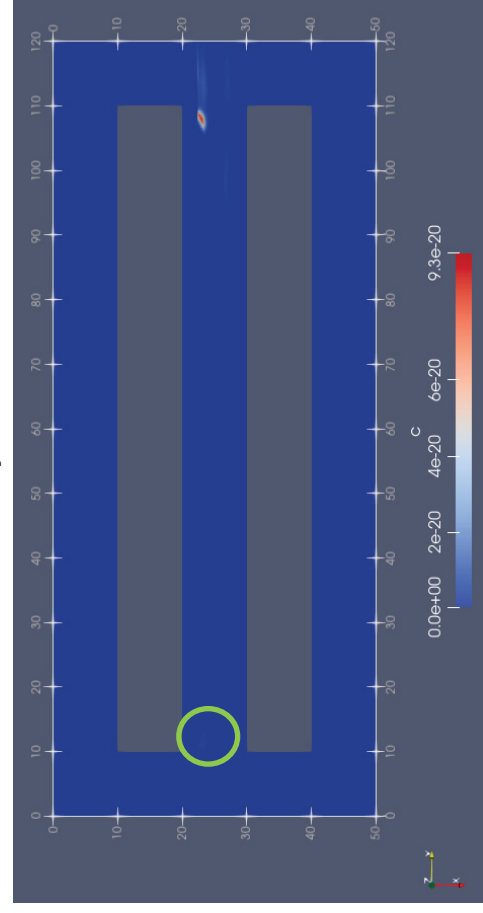
Sem árvores -  $U = (0;2;0)$



Sem árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m



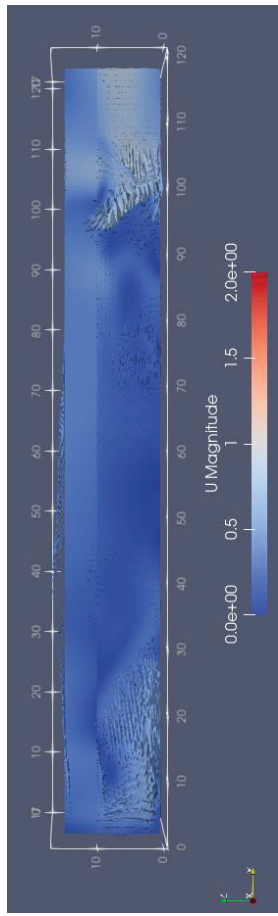
Com árvores -  $U = (0;2;0)$



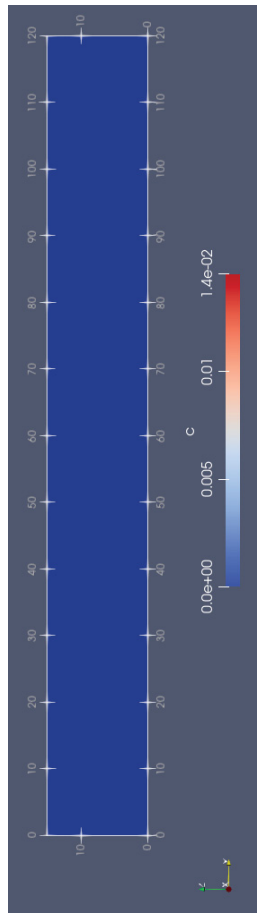
Com árvores - Concentração na horizontal em 1,65 m

FONTE: A autora (2023).

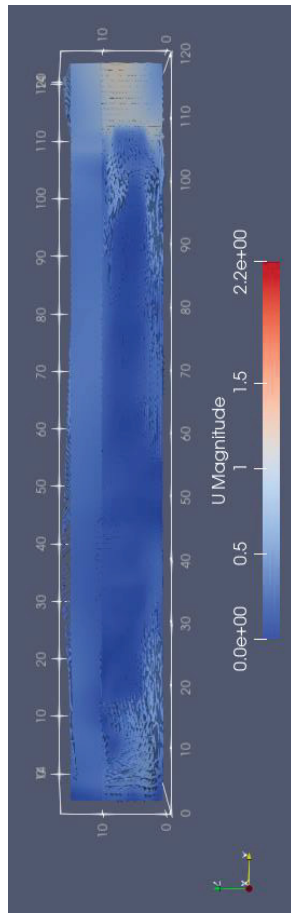
FIGURA 46 – PERFIS DE VELOCIDADE (m/s) E CONCENTRAÇÃO DE MP<sub>2.5</sub> (kg/m<sup>3</sup>) PARA VENTOS INCIDENTES PARALELOS U = (0;2;0) - SEÇÃO LONGITUDINAL NO MEIO DA RUA



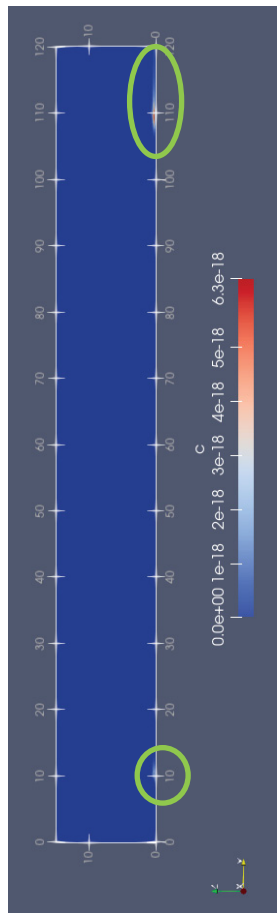
Sem árvores - U = (0;2;0)



Sem árvores - Concentração na vertical no meio da rua



Com árvores - U = (0;2;0)



Com árvores - Concentração na vertical no meio da rua

FONTE: A autora (2023).

TABELA 10 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE MP<sub>2,5</sub>: PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA (0°) - SEÇÕES LONGITUDINAIS EM DIFERENTES ALTURAS

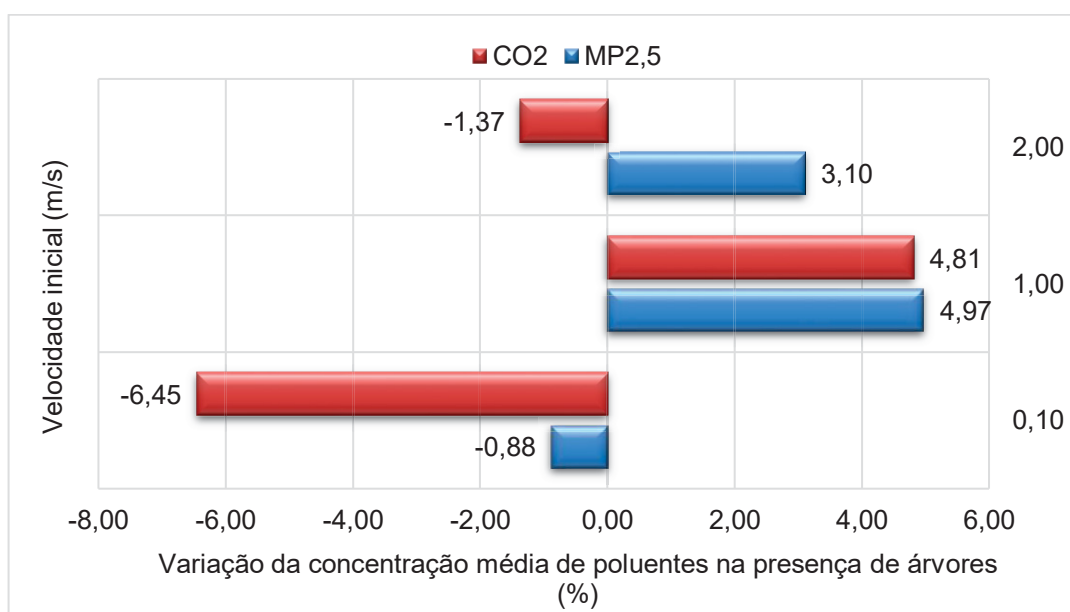
U inicial (m/s)	Altura (m)	Sem árvores			Com árvores			Variação da C média (%)
		U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	U média (m/s)	C média (kg/m <sup>3</sup> )	C média (µg/m <sup>3</sup> )	
0,100	1,000	0,011	1,530x10 <sup>-32</sup>	1,530x10 <sup>-23</sup>	1,722x10 <sup>-2</sup>	3,900x10 <sup>-39</sup>	3,900x10 <sup>-30</sup>	-100,000
	1,500	0,011	2,370x10 <sup>-39</sup>	2,370x10 <sup>-30</sup>	7,859x10 <sup>-3</sup>	0,000	0,000	-100,000
	1,650	0,011	2,370x10 <sup>-39</sup>	2,370x10 <sup>-30</sup>	2,441x10 <sup>-2</sup>	0,000	0,000	-100,000
	2,000	0,011	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000
	3,000	0,011	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000
1,000	4,000	0,011	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
	10,000	0,012	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000
	1,000	0,181	1,680x10 <sup>-25</sup>	1,680x10 <sup>-16</sup>	0,152	7,640x10 <sup>-26</sup>	7,640x10 <sup>-17</sup>	-54,524
	1,500	0,069	7,030x10 <sup>-31</sup>	7,030x10 <sup>-22</sup>	0,079	1,160x10 <sup>-32</sup>	1,160x10 <sup>-23</sup>	-98,350
	1,650	0,250	5,570x10 <sup>-32</sup>	5,570x10 <sup>-23</sup>	0,116	6,670x10 <sup>-33</sup>	6,670x10 <sup>-24</sup>	-88,025
2,000	2,000	0,158	2,360x10 <sup>-31</sup>	2,360x10 <sup>-22</sup>	0,114	1,470x10 <sup>-32</sup>	1,470x10 <sup>-23</sup>	-93,771
	3,000	0,032	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000
	4,000	0,041	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000
	10,000	0,100	0,000	0,000	0,127	0,000	0,000	0,000
	2,000	1,000	0,286	2,770x10 <sup>-22</sup>	2,770x10 <sup>-13</sup>	0,354	5,430x10 <sup>-23</sup>	5,430x10 <sup>-14</sup>
1,500		0,152	7,130x10 <sup>-26</sup>	7,130x10 <sup>-17</sup>	0,354	5,330x10 <sup>-27</sup>	5,330x10 <sup>-18</sup>	-92,525
1,650		0,296	1,100x10 <sup>-27</sup>	1,100x10 <sup>-18</sup>	0,346	5,480x10 <sup>-29</sup>	5,480x10 <sup>-20</sup>	-95,018
2,000		0,296	1,600x10 <sup>-29</sup>	1,600x10 <sup>-20</sup>	0,334	5,410x10 <sup>-31</sup>	5,410x10 <sup>-22</sup>	-96,619
3,000		0,291	3,310x10 <sup>-35</sup>	3,310x10 <sup>-26</sup>	0,259	4,770x10 <sup>-37</sup>	4,770x10 <sup>-28</sup>	-98,559
4,000	4,000	0,289	1,700x10 <sup>-39</sup>	1,700x10 <sup>-30</sup>	0,213	0,000	0,000	-100,000
	10,000	0,311	0,00	0,000	0,325	0,000	0,000	0,000

FONTE: A autora (2023).

#### 4.2.3 Avaliação da remoção de poluentes

Os resultados indicaram que as árvores foram mais eficazes para remoção de CO<sub>2</sub> do que MP<sub>2,5</sub>, principalmente para direção perpendicular do vento, conforme apresentado na FIGURA 47. Não foram verificadas variações tão significativas entre os dois poluentes, pois, as partículas finas tendem a se dispersar no ar como gases (KUMAR *et al.*, 2008).

FIGURA 47 – VARIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES: DIREÇÃO DO VENTO PERPENDICULAR AO EIXO PRINCIPAL DA RUA



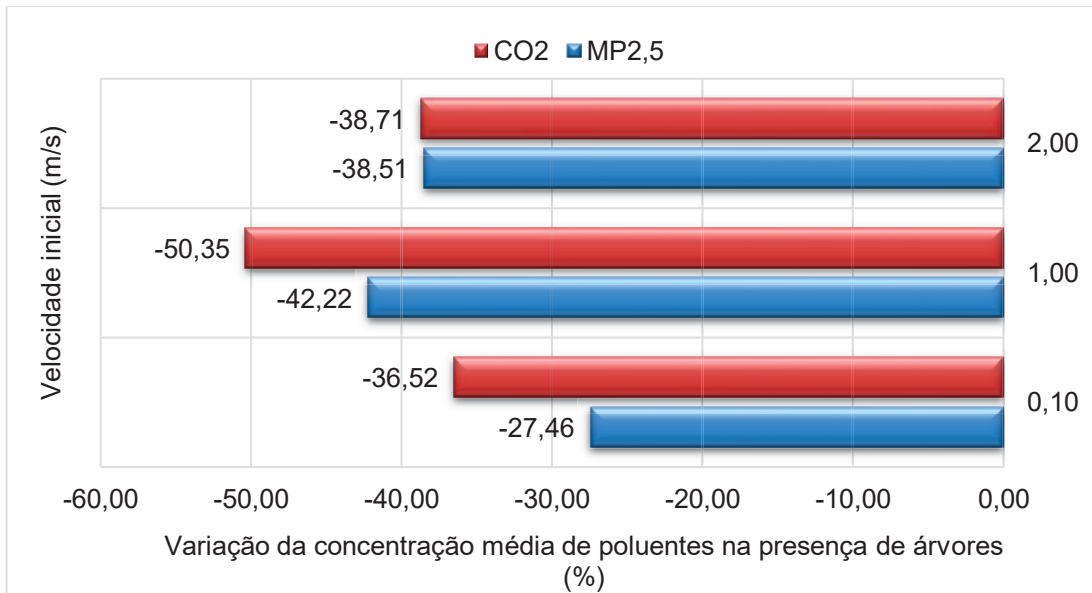
FONTE: A autora (2023).

As maiores reduções nas concentrações foram observadas em simulações com ventos incidentes paralelos, nas seções longitudinais no meio da rua entre 0 m e 15 m (FIGURA 48), para uma velocidade inicial de 1,00 m/s. Nessas condições, foram obtidas reduções de 50,35% para CO<sub>2</sub> e 42,22% para MP<sub>2,5</sub>. Esses resultados estão em consonância com o estudo de Lin *et al.* (2014), que também identificou maiores reduções nas concentrações de poluentes na presença de árvores em cenários com ventos paralelos.

Em relação aos ventos incidentes perpendiculares, foi observado que a velocidade do vento exerceu maior influência na região central da simulação. Nessa condição, ocorreu a deposição do contaminante no lado a barlavento dos prédios,

uma vez que o vento foi direcionado para a frente dessas estruturas, que funcionaram como obstáculos, impedindo a passagem do contaminante.

FIGURA 48 – VARIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NA PRESENÇA DE ÁRVORES: DIREÇÃO DO VENTO PARALELO AO EIXO PRINCIPAL DA RUA



FONTE: A autora (2023).

Nas simulações com ventos incidentes paralelos, foram identificadas maiores concentrações de poluentes no início e no final da rua. Isso se deve à formação de redemoinhos de vento nas esquinas da rua, especialmente em velocidades mais altas, resultando no acúmulo de poluentes nessas regiões.

No caso das simulações realizadas com valores reais de concentração emitida pelo escapamento de um veículo, foram observadas concentrações médias elevadas de CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> para velocidades iniciais do vento de 1,00 m/s e 2,00 m/s, com direção paralela ao eixo principal da rua, em uma seção transversal realizada a uma altura de 1,65 m (altura média da respiração de um pedestre).

## 5 CONCLUSÃO

Os testes preliminares do modelo adotado em um *street canyon* hipotético, considerando a presença de árvores, indicaram uma redução na concentração de CO<sub>2</sub> e uma melhora na dispersão dos poluentes com o aumento da velocidade do vento. Nas simulações realizadas nesse contexto para os poluentes CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub>, utilizando valores reais de concentração emitida pelo escapamento de um veículo em regime estacionário, foram observadas concentrações médias elevadas de CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> para velocidades iniciais de vento de 1 m/s e 2 m/s, com direção paralela ao eixo principal da rua, na altura de 1,65 m que representa a altura da respiração de um pedestre.

Os resultados indicaram que, de maneira geral, a presença de árvores resultou em uma maior redução das concentrações de CO<sub>2</sub> em comparação com MP<sub>2,5</sub>. As maiores reduções foram observadas na velocidade inicial de 1 m/s, com ventos paralelos no eixo principal da rua, em uma seção transversal de 0 m a 15 m.

A presença de árvores em um *street canyon* teve um impacto significativo na redução das concentrações de poluentes atmosféricos, como CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub>. Isso ocorreu devido à interação complexa entre o fluxo de ar, a geometria do *canyon* e a presença de obstáculos naturais, como as árvores.

Em relação ao CO<sub>2</sub>, observou-se que a presença de árvores resultou em uma redução mais expressiva nas concentrações em comparação com o MP<sub>2,5</sub>. Isso pode ser atribuído ao fato de que o CO<sub>2</sub> é um gás de difusão mais rápida, enquanto o MP<sub>2,5</sub> é formado por partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, que podem ser mais persistentes e menos influenciadas pela presença das árvores.

As maiores reduções nas concentrações foram observadas na velocidade inicial de 1 m/s, quando os ventos sopravam paralelamente ao eixo principal da rua. Essa configuração favoreceu a interação entre o fluxo de ar e as árvores, resultando em uma maior dissipação e dispersão dos poluentes ao longo da seção transversal de 0 m a 15 m.

Notou-se que as concentrações mais elevadas de CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> estavam localizadas próximas ao nível do solo. Essa distribuição de concentração é atribuída ao fenômeno conhecido como canalização do vento no *canyon*. As concentrações mais elevadas de CO<sub>2</sub> e MP<sub>2,5</sub> foram registradas em alturas de até 4 metros na região central da rua. Essa distribuição vertical das concentrações destaca a importância de



compreender a dinâmica do fluxo de ar no *street canyon* e considerar a altura da camada limite atmosférica na avaliação dos impactos da poluição atmosférica.

Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias eficazes de mitigação da poluição em áreas de *street canyons*, incluindo a adoção de medidas como a implementação de soluções de ventilação urbana e o planejamento adequado da vegetação. Medidas de mitigação da poluição do ar, como o uso de árvores, podem ser soluções viáveis para melhorar a qualidade do ar em *street canyons* regulares. O plantio de árvores é uma opção de baixo custo e fácil implementação. Recomenda-se a realização de simulações semelhantes às deste estudo para avaliar a viabilidade dessa opção para a localidade em questão.

É fundamental realizar estudos específicos e simulações adicionais para cada contexto urbano, levando em consideração as características do terreno, a geometria das ruas e outros fatores que possam influenciar a dispersão dos poluentes. O uso de *softwares* de modelagem de poluentes deve ser complementado por dados reais de monitoramento e estudos específicos para obter resultados mais precisos.

## REFERÊNCIAS

ABHIJITH, K. V.; KUMAR, P.; GALLAGHER, J.; MCNABOLA, A.; BALDAUF, R.; PILLA, F.; BRODERICK, B.; SABATINO, S.; PULVIRENTI, B. *Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review*. **Atmospheric Environment**, v. 162, p. 71-86, ago. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez22.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1352231017303151>. Acesso em: 09 out. 2022.

ÁLVARES JÚNIOR, O. M.; LINKE, R. R. A. **Metodologia Simplificada para Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa de Frotas de Veículos no Brasil**. 2002. Disponível em: [https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/gases\\_efeito\\_estufa](https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/gases_efeito_estufa). Acesso em: 01 nov. 2022.

ANDERSON, J. O.; THUNDIYIL, J. G.; STOLBACH, A. *Clearing the Air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health*. **Journal Of Medical Toxicology**, v. 8, n. 2, p. 166-175, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22194192/>. Acesso em: 15 out. 2022.

ANDREÃO, W. L.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; KUMAR, P. *Excess deaths associated with fine particulate matter in Brazilian cities*. **Atmospheric Environment**, v. 194, p. 71-81, 2018. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201800469161>. Acesso em: 21 out. 2022.

ARAÚJO, I. **Metodologia para medição de emissão de material particulado em canteiros de obras**. 2014. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <https://ppec.ufba.br/files/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Ingrid%202014.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2022.

ARROYO, F.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Influência do Tamanho da Malha em Simulações Numéricas Via Elementos Finitos. **Revista Internacional de Ciências**, v. 12, n. 2, p. 95-107, 31 ago. 2022. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/download>. Acesso em: 08 dez. 2022.

AUTODESK. **Projeto Assistido por Computador: Software CAD**. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/solutions/cad-software>. Acesso em: 09 dez. 2021.

AYACHIT, U. **The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application**. Kitware, 2015. Disponível em: <https://docs.paraview.org/en/latest/UsersGuide/introduction.html>. Acesso em: 02 jul. 2023.

BASIŃSKA, M.; RATAJCZAK, K.; MICHAŁKIEWICZ, M.; FUĆ, P.; SIEDLECKI, M. *The Way of Usage and Location in a Big City Agglomeration as Impact Factors of the Nurseries Indoor Air Quality*. **Energies**, v. 14, n. 22, p. 7534, 11 nov. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7534>. Acesso em: 03 set. 2022.

BBC Brasil. **Como a China conseguiu cortar pela metade a poluição do ar em 7 anos**. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-62053174>. Acesso em: 09 mar. 2023.

BENDER, A. P.; DZIEDZIC, M. Dispersão de poluentes nos eixos estruturais em Curitiba (PR), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n., p. 31-42, 05 dez. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/zDFZxZzccGhY6ytdn9sNZrg/?lang=pt>. Acesso em: 13 jun. 2023.

BERINGUI, K.; QUIJANO, M.; JUSTO, E.; VENTURA, L.; GIODA, A. Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: [http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422021000600737&lng=en&nrm=iso](http://old.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422021000600737&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 01 maio 2022.

BUCCOLIERI, R.; GROMKE, C.; DI SABATINO, S.; RUCK, B. *Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons*. **Science Of The Total Environment**, v. 407, n. 19, p. 5247-5256, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19596394/>. Acesso em: 02 maio 2022.

BUCCOLIERI, R.; JEANJEAN, A. P. R.; GATTO, E.; LEIGH, R. J. *The impact of trees on street ventilation, Nox and PM<sub>2.5</sub> concentrations across heights in Marylebone Rd street canyon, central London*. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 227-241, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/12378> Acesso em: 10 maio 2022.

CANONICAL LTD. **Ubuntu downloads**. 2023. Disponível em: <https://ubuntu.com/download>. Acesso em: 09 fev. 2023.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Poluentes**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/> Acesso em: 30 jun. 2021.

CHEN, F.; KUSAKA, H.; BORNSTEIN, R.; CHING, J.; GRIMMOND, C. S. B.; GROSSMAN-CLARKE, S.; LORIDAN, T.; MANNING, K. W.; MARTILLI, A.; MIAO, S. *The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems*. **International Journal Of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 273-288, 20 jan. 2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.2158#>. Acesso em: 06 dez. 2022.

CHOWDHURY, S.; DEY, S.; GUTTIKUNDA, S.; PILLARISSETTI, A.; SMITH, K. R.; GIROLAMO, L. *Indian annual ambient air quality standard is achievable by completely mitigating emissions from household sources*. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, v. 116, n. 22, p. 10711-10716, 15 abr. 2019. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1900888116>. Acesso em: 06 dez. 2022.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed. 223, 21 nov. 2018. Seção 1, p. 155. Disponível em:

<https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/36809>. Acesso em: 02 out. 2022.

COSTA JUNIOR, J. R. C. **Análise de Barragem com Geometria em Gabiões através de Modelagem CFD (Fluidodinâmica Computacional)**. 2019. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1094079>. Acesso em: 08 nov. 2022.

CUI, D.; HU, G.; AI, Z.; DU, Y.; MAK, C. M.; KWOK, K. *Particle image velocimetry measurement and CFD simulation of pedestrian level wind environment around U-type street canyon*. **Building And Environment**, v. 154, p. 239-251, maio 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132319301854>. Acesso em: 31 out. 2022.

DEPAUL, F. T.; SHEIH, C. M. *Measurements of wind velocities in a street canyon*. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 20, p. 455-459, 1986. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Measurements-of-wind-velocities-in-a-street-canyon-Depaul-Sheih/053450c4e380101b32712e66b8189546973f6ddf>. Acesso em: 23 out. 2022.

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. 4. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 232 p.

DE SIMONI, W. *et al.* **O Estado da qualidade do ar no Brasil**. *Working Paper*. 2021. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. Disponível em: [https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da\\_qualidade-do-ar-no-brasil.pdf](https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-o-estado-da_qualidade-do-ar-no-brasil.pdf). Acesso em: 03 jan. 2023.

DHAKA, S. K.; CHETNA; KUMAR, V.; PANWAR, V.; DIMRI, A. P.; SINGH, N.; PATRA, P. K.; MATSUMI, Y.; TAKIGAWA, M.; NAKAYAMA, T. *PM<sub>2.5</sub> diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology*. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 10 ago. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-70179-8>. Acesso em: 28 out. 2022.

EHRNSPERGER, L.; KLEMM, O. *Air pollution in an urban street canyon: novel insights from highly resolved traffic information and meteorology*. **Atmospheric Environment: X**, v. 13, p. 100151, jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162122000053>. Acesso em: 18 jun. 2023.

EPA – Environmental Protection Agency. **Learn About How Mobile Source Pollution Affects Your Health**. Disponível em: <https://www.epa.gov/mobile-source-pollution/learn-about-how-mobile-source-pollution-affects-your-health>. Acesso em: 28 maio. 2022.

FANTOZZI, F.; MONACI, F.; BLANUSA, T.; BARGAGLI, R. *Spatio-temporal variations of ozone and nitrogen dioxide concentrations under urban trees and in a nearby open area*. **Urban Climate**, v. 12, p. 119-127, jun. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095515000061>. Acesso em: 10 set. 2022.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. 2ª ed. São Paulo: USP, 2012.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISS, B. **Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment**. Hamburg, Germany. 2007. Disponível em: <https://theairshed.com/pdf/COST%20732%20Best%20Practice%20Guideline%20May%202007.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.

FULLER, R.; LANDRIGAN, P. J.; BALAKRISHNAN, K.; BATHAN, G.; BOSE-O'REILLY, S.; BRAUER, M.; CARAVANOS, J.; CHILES, T.; COHEN, A.; CORRA, L. *Pollution and health: a progress update*. **The Lancet Planetary Health** v. 6, n. 6, p. 535-547, jun. 2021. Disponível em: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00090-0/fulltext#](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00090-0/fulltext#). Acesso em: 11 mar. 2023.

GREENSHIELDS, C. J. **User Guide version 7**. OpenFOAM Foundation Ltda. 2019.

GROMKE, C. *A vegetation modeling concept for Building and Environmental Aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies*. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2094-2099, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749110005221>. Acesso em: 02 set. 2021.

GROMKE, C.; BUCCOLIERI, R.; DI SABATINO, S.; RUCK, B. *Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data*. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 37, p. 8640-8650, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008007553>. Acesso em: 14 set. 2021.

GROMKE, C.; RUCK, B. *Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon – Experimental investigation of the flow and concentration field*. **Atmospheric Environment**, v. 41, ed. 16, p. 3287-3302, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007000076>. Acesso em: 21 set. 2021.

GROMKE, C.; RUCK, B. *Pollutant Concentrations in Street Canyons of Different Aspect Ratio with Avenues of Trees for Various Wind Directions*. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 144, p. 41-64, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-012-9703-z>. Acesso em: 28 set. 2021.

GUALTIERI, G. A. S. C. *Model Intercomparison in Florence, Italy*. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 212, n. 1-4, p. 461-482, 18 mar. 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-010-0360-x>. Acesso em: 15 jan. 2023.

GUAN, Y.; XIAO, Y.; RONG, B.; LU, W.; ZHANG, N.; QIN, C. *Assessing the synergy between CO<sub>2</sub> emission and ambient PM<sub>2.5</sub> pollution in Chinese cities: an integrated study based on economic impact and synergy index*. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 99, p. 106989, mar. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925522002554>. Acesso em: 28 mar. 2023.

GUILHOTTI, S. L. **Estudo do comportamento dinâmico de poluentes em um laboratório educacional climatizado**. 2022. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-12082022-085637/fr.php>. Acesso em: 01 dez. 2022.

HOFMAN, J.; STOKKAER, I.; SNAUWAERT, L.; SAMSON, R. *Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles*. **Environmental Pollution**, v. 183, p. 123-132, dez. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749112004253>. Acesso em: 06 dez. 2022.

HOLZINGER, G. *OpenFOAM: A little User-Manual*. **Particulate Flow Modelling**, Johannes Kepler University, Linz, Austria. 2018.

HUANG, Y. D.; HOU, R. W.; LIU, Z. Y.; SONG, Y.; CUI, P. Y.; KIM, C. N. *Effects of Wind Direction on the Airflow and Pollutant Dispersion inside a Long Street Canyon*. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 19, n. 5, p. 1152-1171, 2019. Disponível em: <https://aaqr.org/articles/aaqr-18-09-0a-0344>. Acesso em: 02 jul. 2023.

IBG INDÚSTRIA BRASILEIRA DE GASES LTDA. **Dióxido de Carbono**. Revisão 03 de junho de 2015. Disponível em: <https://www.ibg.com.br/dioxido-de-carbono.html>. Acesso em: 25 mar. 2023.

IBG INDÚSTRIA BRASILEIRA DE GASES LTDA. **Hexafluoreto de Enxofre**. Revisão 11 de janeiro de 2016. Disponível em: <https://www.ibg.com.br/hexafluoreto-de-enxofre.html>. Acesso em: 25 mar. 2023.

JATOBÁ, L. **Introdução à CFD usando o OpenFOAM**. 2016. 51 slides.

JANHÄLL, S. *Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion*. **Atmospheric Environment**, v. 105, p. 130-137, mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015000758>. Acesso em: 07 nov. 2022.

JEANJEAN, A. P. R.; GALLAGHER, J.; MONKS, P. S.; LEIGH R. J. *Ranking current and prospective NO<sub>2</sub> pollution mitigation strategies: An environmental and economic modelling investigation in Oxford Street, London*. **Environmental Pollution**, v. 225, p. 587-597, 2017.

JEANJEAN, A. P. R.; MONKS, P. S.; LEIGH R. J. *Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM<sub>2.5</sub> reduction via dispersion and deposition at a city scale*. **Atmospheric Environment**, v. 147, p. 1-10, 2016.

KAMMER, L. **Avaliação da exposição à intensidade sonora em uma empresa de inspeção de segurança veicular**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança no Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/20358>. Acesso em: 23 mar. 2022.

KITWARE INC. *Unleash the Power of ParaView*. 2023. Disponível em: <https://www.paraview.org/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

KUMAR, P.; FENNELL, P.; BRITTER, R. *Measurements of particles in the 5–1000 nm range close to road level in an urban street canyon*. **Science Of The Total Environment**, v. 390, n. 2-3, p. 437-447, 15 fev. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969707010947>. Acesso em: 11 dez. 2022.

KUMAR, P.; FENNELL, P. S.; HAYHURST, A. N.; BRITTER, R. E. *Street Versus Rooftop Level Concentrations of Fine Particles in a Cambridge Street Canyon*. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 131, n. 1, p. 3-18, 9 ago. 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-008-9300-3>. Acesso em: 17 jun. 2023.

KUMAR, P.; KHARE, M.; HARRISON, R. M.; BLOSS, W. J.; LEWIS, A. C.; COE, H.; MORAWSKA, L. *New directions: air pollution challenges for developing megacities like delhi*. **Atmospheric Environment**, v. 122, p. 657-661, dez. 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84945135759&origin=inward&txGid=26b856f05af2a10f7b44129493faf07f>. Acesso em: 09 fev. 2023.

LANGNER, M.; KULL, M.; ENDLICHER, W. R. *Determination of PM<sub>10</sub> deposition based on antimony flux to selected urban surfaces*. **Environmental Pollution**, v. 159, p. 2028-2034, 2011.

LEELOSSY, A.; MOLNAR, F. J. R.; IZSAK, F.; HAVASI, I. A.; LAGZI, R. M. *Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review*. **Central European Journal of Geosciences**, v. 6, n. 3, p. 257-278, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.2478/s13533-012-0188-6>. Acesso em: 13 ago. 2022.

LELIEVELD, J.; EVANS, J. S.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, A. *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale*. **Nature**, v. 525, n. 7569, p. 367-371, set. 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature15371#citeas>. Acesso em: 07 jan. 2023.

LENTZ MEIO AMBIENTE. **Estudo de Dispersão Atmosférica**. 2023. Disponível em: <https://www.lentzmeioambiente.com.br>. Acesso em: 12 mar. 2023.

LI, X.; LU, Q.; LU, S.; HE, H.; PENG, Z.; GAO, Y.; WANG, Z. *The impacts of roadside vegetation barriers on the dispersion of gaseous traffic pollution in urban street canyons*. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 17, p. 80-91, jun. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866715301242>. Acesso em: 21 mar. 2023.

LIN, M.; HANG, J.; LI, Y.; LUO, Z.; SANDBERG, M. *Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density*. **Building And Environment**, v. 79, p. 152-167, set. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132314001449>. Acesso em: 07 set. 2022.

LIU, J.; CAO, Z.; ZOU, S.; LIU, H.; HAI, X.; WANG, S.; DUAN, J.; XI, B.; YAN, G.; ZHANG, S.; Z., J. *An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China.* **Science Of The Total Environment**, v. 616-617, p. 417-426, mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717330322?via%3Dihub>. Acesso em: 06 fev. 2023.

LIU, S.; ZHANG, P. *Foreign Direct Investment and Air Pollution in China: Evidence from the Global Financial Crisis.* **The Developing Economies**, v. 60, p. 30-61, 09 dez. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/deve.12298>. Acesso em: 08 set. 2022.

LIU, W. *Numerical models for vehicle exhaust dispersion in complex urban areas.* **International Journal For Numerical Methods In Fluids**, v. 67, n. 6, p. 787-804, 25 ago. 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fld.2396>. Acesso em: 01 nov. 2022.

LOPES, I. C. **Avaliação da exposição de crianças a matéria particulada em ambiente urbano.** 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Técnico Lisboa, Lisboa, 2018. Disponível em: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258635/Dissertacao\\_\\_InesLopes\\_.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258635/Dissertacao__InesLopes_.pdf). Acesso em: 09 fev. 2023.

LV, W.; WU, Y.; ZANG, J. *A Review on the Dispersion and Distribution Characteristics of Pollutants in Street Canyons and Improvement Measures.* **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6155, 27 set. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/19/6155>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Guia Técnico de Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar.** 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/mma-guia-tecnico-qualidade-do-ar-pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab.* **Springer International Publishing**, v. 113, 791 p., 2016.

NUNZIO, G.; LARAKI, M.; THIBAUT, L. *Road Traffic Dynamic Pollutant Emissions Estimation: from macroscopic road information to microscopic environmental impact.* **Atmosphere**, v. 12, n. 1, p. 53, 31 dez. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/1/53>. Acesso em: 01 nov. 2022.

OPEN CASCADE. **What is SALOME.** 2021. Disponível em: <https://www.salome-platform.org/>. Acesso em: 09 dez. 2021.

OPENCFD LTD. **Chapter 1 Introduction.** 2023. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/1-introduction#x3-20001>. Acesso em: 09 fev. 2023.

OPENFOAM. **OpenFoam 7.** Fundação OpenFoam, 2019. Programa de Computador.

PARAVIEW. **Paraview 5.9.** Kitware, Inc, 2021. Programa de Computador.



PUGH, T. A. M.; MACKENZIE, A. R.; WHYATT, J. D.; HEWITT, C. N. *Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons*. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 14, p. 7692-7699, 28 jun. 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es300826w>. Acesso em: 05 nov. 2022.

RIES, K.; EICHHORN, J. *Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons*. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 10, p. 229-233, 2001.

SALOME. **Salome 9.8.0**. EDF-CEA, 2021. Programa de Computador.

SANTOS, U. P.; ARBEX, M. A.; BRAGA, A. L. F.; MIZUTANI, R. F.; CANÇADO, J. E. D.; TERRA-FILHO, M.; SIEDLECKI, M. et al. *Emission investigation from passenger car equipped with gasoline direct injection engine in real traffic conditions*. **Autobusy**, v. 12, p. 404-409, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/1/66>. Acesso em: 09 fev. 2023.

SCIENCE OF SOUTH AFRICA, A. OF.; SCIENCES, B.A. OF.; LEOPOLDINA, G.N.A. OF S.; MEDICINE, U.S.N.A. OF.; SCIENCES, U.S.N.A. OF. *Air Pollution and Health – A Science-Policy Initiative*. **Annals of Global Health**, 85, p.140. 2019. Disponível em: <https://annalsofglobalhealth.org/articles/10.5334/aogh.2656>. Acesso em: 09 maio. 2023.

SCHRAIER, J. A. **Análise dos efeitos das partículas inaláveis (MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>) na saúde da população de Curitiba/PR**. 2022. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Meio Ambiente Urbano e Industrial, UFPR, Curitiba, 2022.

SIEBERT, D.; SALAZAR, J. **Introdução ao OpenFOAM**. 2021. 70 slides.

SINGLA, S.; BANSAL, D.; MISRA, A.; RAHEJA, G. *Towards an integrated framework for air quality monitoring and exposure estimation - a review*. **Environmental Monitoring And Assessment**, v. 190, n. 9, p. 1-2, 31 ago. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-018-6940-8>. Acesso em: 25 out. 2022.

SRIVASTAVA, A. P. *Effect of Tree placement on Wind Flow Pattern in building in Warm and Humid Climate*. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 10, p. 1659-1662, set. 2019. Disponível em: <https://www.ijser.org/researchpaper/Effect-of-Tree-placement-on-Wind-Flow-Pattern-in-building-in-Warm-and-Humid-Climature.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2023.

STEFFENS, J. T.; WANG, Y. J.; ZHANG, K. M. *Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment*. **Atmospheric Environment**, v. 50, p. 120-128, abr. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011013410>. Acesso em: 11 nov. 2022.

STRAUSS, C.; RICARD, D.; LAC, C.; VERRELLE, A. *Evaluation of turbulence parametrizations in convective clouds and their environment based on a large-eddy simulation*. **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, v. 145, n. 724, p. 319

5-3217, 9 set. 2019. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3614>. Acesso em: 01 mar. 2023.

SUN, D.; ZHANG, Y.; XUE, R.; ZHANG, Y. *Modeling carbon emissions from urban traffic system using mobile monitoring*. **Science of the Total Environment**, v. 599-600, p. 944-951, dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971731032X>. Acesso em: 05 out. 2022.

TAVARES, F. V. F.; BARRETO, A. A.; DUTRA, E. G.; JACOMINO, V. M. F. Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte (MG) utilizando simulação numérica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 315-324, dez. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/F9mHdjXfQL57rM675bBMvVM/?lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2022.

TIWARI, A.; KUMAR, P.; BALDAUF, R.; ZHANG, K. M.; PILLA, F.; SABATINO, S. di; BRATTICH, E.; PULVIRENTI, B. *Considerations for evaluating green infrastructure impacts in microscale and macroscale air pollution dispersion models*. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 410-426, jul. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719313488>. Acesso em: 13 nov. 2022.

TOMSON, M.; KUMAR, P.; BARWISE, Y.; PEREZ, P.; FOREHEAD, H.; FRENCH, K.; MORAWSKA, L.; WATTS, J. F. *Green infrastructure for air quality improvement in street canyons*. **Environment International**, v. 146, p. 106-288, jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020322431>. Acesso em: 16 set. 2022.

VARDOULAKIS, S.; FISHER, B. E. A.; PERICLEOUS, K.; GONZALES-FLESCA, N. *Modelling air quality in street canyon: a review*. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 155-182. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231002008579>. Acesso em: 14 jan. 2022.

VOORDECKERS, D.; MEYSMAN, F. J. R.; BILLEN, P.; TYTGAT, T.; VAN ACKER, M. *The impact of street canyon morphology and traffic volume on NO<sub>2</sub> values in the street canyons of Antwerp*. **Building And Environment**, v. 197, p. 107825, jun. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321002328>. Acesso em: 18 jun. 2023.

VORMITTAG, E. M. P. A. A.; CIRQUEIRA, S. S. R.; NETO, H. W.; SALDIVA, P. H. N. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 7-30, 2021. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/ea/a/fbCFjRbBRhf4M5F6xQVrbfR/#:~:text=O%20Brasil%20disp%C3%B5e%20de%20371,4%20\(1%2C1%25\)](https://www.scielo.br/j/ea/a/fbCFjRbBRhf4M5F6xQVrbfR/#:~:text=O%20Brasil%20disp%C3%B5e%20de%20371,4%20(1%2C1%25)). Acesso em: 02 fev. 2023.

VOS, P. E. J.; MAIHEU, B.; VANKERKOM, J.; JANSSEN, S. *Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?*. **Environmental Pollution**, v. 183, p. 113-122, dez. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749112004605>. Acesso em: 01 ago. 2022.

VRANCKX, S.; VOS, P.; MAIHEU, B.; JANSSEN, S. *Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: A numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium*. **Science of the Total Environment**, v. 532, p. 474-483, 2015.

WADLOW, I.; PATON-WALSH, C.; FOREHEAD, H.; PEREZ, P.; AMIRGHASEMI, M.; GUÉRETTE, E.; GENDEK, O.; KUMAR, P. *Understanding Spatial Variability of Air Quality in Sydney: part 2: a roadside case study*. **Atmosphere**, v. 10, n. 4, p. 217, 23 abr. 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85069837476&origin=inward&txGid=6c0abd9bc96078c48892b83382ac169d>. Acesso em: 05 fev. 2023.

WÄHLIN, P.; PALMGREN, F.; VAN DINGENEN, R.; RAES, F. *Pronounced decrease of ambient particle number emissions from diesel traffic in Denmark after reduction of the sulphur content in diesel fuel*. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 21, p. 3549-3552, jul. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231001000668>. Acesso em: 05 jan. 2023.

WANG, X.; LEI, H.; HAN, Z.; ZHOU, D.; SHEN, Z.; ZHANG, H.; ZHU, H.; BAO, Y. *Three-dimensional delayed detached-eddy simulation of wind flow and particle dispersion in the urban environment*. **Atmospheric Environment**, v. 201, p. 173-189, mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231019300093>. Acesso em: 14 jul. 2022.

WANG, Y.; SZETO, W.; HAN, K.; FRIESZ, T. L. *Dynamic traffic assignment: a review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications*. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 111, p. 370-394, maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261517308056?via%3Dihub>. Acesso em: 22 nov. 2022.

WHO – World Health Organization. **Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia**. Regional Office for Europe, Copenhagen, 2013.

WHO – World Health Organization. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. 2021. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. Acesso em: 24 out. 2021.

WHO – World Health Organization. **7 million premature deaths annually linked to air pollution**. 2014. Disponível em: <https://bit.ly/3aU9Tuz>. Acesso em: 25 jun. 2021.

WU, M.; ZHANG, G.; WANG, L.; LIU, X.; WU, Z. *Influencing Factors on Airflow and Pollutant Dispersion around Buildings under the Combined Effect of Wind and Buoyancy - A Review*. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, v. 19, n. 19, 8 out. 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9566737/>. Acesso em: 02 jul. 2023.

WYLIE, H. *Atmospheric Dispersion and Pollution Transport*. **Air Quality Portal**. NC State University. Disponível em: <https://airquality.climate.ncsu.edu/2021/06/06/atmospheric-dispersion-and-pollution-transport/>. Acesso em: 02 jul. 2023.

XIONG, Y.; CHEN, H. *Impacts of uneven surface heating of an ideal street canyon on airflows and indoor ventilation: numerical study using openfoam coupled with energyplus*. **Building Simulation**, v. 15, n. 2, p. 265-280, 26 maio 2021. Disponível em: <https://www.sciopen.com/article/10.1007/s12273-021-0788-5?issn=1996-3599>. Acesso em: 03 mar. 2023.

YI, F.; YE, H.; WU, X.; ZHANG, Y. Y.; JIANG, F. *Self-aggravation Effect of Air Pollution: Evidence from Residential Electricity Consumption in China*. **Energy Economics**, v. 86, p. 104684, fev. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988320300232>. Acesso em: 14 fev. 2023.

ZAVALA-REYES, J. C.; JEANJEAN, A. P. R.; LEIGH, R. J.; HERNÁNDEZ-PANIAGUA, I. Y.; ROSAS-PÉREZ, I.; JAZCILEVICH, A. *Studying human exposure to vehicular emissions using computational fluid dynamics and an urban mobility simulator: the effect of sidewalk residence time, vehicular technologies and a traffic-calming device*. **Science Of The Total Environment**, v. 687, p. 720-731, out. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719324763>. Acesso em: 06 mar. 2023.

ZENG, F.; LEI, C.; LIU, J.; NIU, J.; GAO, N. *CFD simulation of the drag effect of urban trees: source term modification method revisited at the tree scale*. **Sustainable Cities And Society**, v. 56, p. 102079, maio 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720300664>. Acesso em: 02 fev. 2023.

ZHANG, H.; WANG, Y.; LI, S.; TANG, H.; LIU, X.; WANG, Y. *Study on the Influence of the Street Side Buildings on the Pollutant Dispersion in the Street Canyon*. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 37-44, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815027447>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ZHANG, X.; WARGOCKI, P.; LIAN, Z.; THYREGOD, C. *Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance*. **Indoor Air**, v. 27, n. 1, p. 47-64, 7 mar. 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26825447/>. Acesso em: 13 ago. 2022.