



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia

Câmpus de Sorocaba

Gabriel Sanchez e Souza

**LÓGICA FUZZY APLICADA À AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE DE
SÃO PAULO**

SOROCABA/SP

2024

Gabriel Sanchez e Souza

**LÓGICA FUZZY APLICADA À AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE DE
SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciência e
Tecnologia de Sorocaba,
Universidade Estadual Paulista
(UNESP), como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda

SOROCABA/SP

2024

S729l Souza, Gabriel Sanchez e
Lógica fuzzy aplicada à avaliação da qualidade do ar na
cidade de São Paulo / Gabriel Sanchez e Souza. --
Sorocaba, 2024
82 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: José Arnaldo Frutuoso Roveda

1. Engenharia ambiental. 2. Poluição. 3. Ar - Poluição.
4. Ar - Qualidade. I. Título.

Gabriel Sanchez e Souza

**LÓGICA FUZZY APLICADA À AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE DE
SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciência e
Tecnologia de Sorocaba,
Universidade Estadual Paulista
(UNESP), como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Data da defesa: 22/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dra. Maria Lúcia Pereira Antunes
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

RESUMO

A dispersão de gases tóxicos, tanto em ambientes urbanos quanto rurais, e suas implicações na saúde humana, é um problema de forte preocupação na área de atuação dos cientistas e engenheiros ambientais. Tal questão tem um forte impacto na qualidade de vida da população, principalmente nas grandes cidades e regiões metropolitanas. Em áreas urbanas, próximas de áreas com grande quantidade de fábricas e indústrias instaladas, pode ocorrer o risco de poluição do ar, que passa a ser uma séria questão de saúde pública. Com esse cenário, observa-se a necessidade emergente de desenvolver e aprimorar ferramentas que permitam melhores métodos de controle e monitoramento da qualidade do ar, a fim de proporcionar um ambiente mais saudável e sustentável para os cidadãos.

Considerando essas questões e sua demanda por soluções eficientes esse trabalho busca desenvolver novas ferramentas para controle e monitoramento de gases tóxicos, seguindo os parâmetros da Cetesb. Como principal objetivo, destaca-se o estudo dos conceitos relacionados à Lógica fuzzy, mais especificamente dos Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF), com o intuito de aplicá-los no controle, avaliação e monitoramento de gases tóxicos. Esta ferramenta permitirá analisar dados, obtidos da Cetesb, a partir de conjuntos fuzzy criados que atribuem valores em função de uma determinada variável estudada. Com o uso desse sistema será possível obter, a partir da concentração dos gases em uma região, um método eficiente que avalie a qualidade do ar, isto é, quão poluída está uma região frente à quantidade de gases tóxicos presentes.

Palavras-chave: Gases. Tóxico. Ar. Qualidade. Fuzzy. Sistema. Cetesb.

ABSTRACT

The dispersion of toxic gases, both in urban and rural environments, and their impacts for human health, is a great concern in the field of environmental scientists and engineers. This situation has a significant impact on the quality of life of the population, particularly in large cities and metropolitan region areas. In urban spaces, close to regions with a high concentration of factories and industries, there is a greater risk of air pollution, which becomes a serious public health issue. Given this scenario, there is an urgent need to develop and improve tools that allow better methods for controlling and monitoring air quality, in order to provide a healthier and more sustainable environment for citizens.

Considering these issues and the demand for efficient solutions, this work aims to develop new tools for controlling and monitoring toxic gases, following Cetesb parameters. The main objective is to study concepts related to fuzzy logic, specifically Fuzzy Rule-Based Systems (FRBS), with the aim of applying them to the control, evaluation, and monitoring of toxic gases. This tool will allow the analysis of data, obtained from Cetesb, through fuzzy sets that assign values based on a certain studied specific variable. Using this system, it will be possible to obtain from the concentration of gases in a region an efficient method to evaluate air quality, that is, how polluted an area is based on the amount of existing toxic gases.

Key word: Gases. Toxic. Air. Quality. Fuzzy. System. Cetesb

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Função Fuzzy para Valores de Concentração	17
Figura 2 - Boletim Diário da qualidade do Ar Cetesb	21
Figura 3 - Pontos da Capital e poluentes, medidos pela Cetesb.....	21
Figura 4 - Esquema de um Sistema Fuzzy	22
Figura 5 - Função Triangular Fuzzy	23
Figura 6 - Função Trapezoidal Fuzzy.....	24
Figura 7 - Sistemas Fuzzy criados.....	25
Figura 8 - Regras do Sistema S1 no R	32
Figura 9 - Função de Pertinência do Material Particulado 2,5	38
Figura 10 - Função de Pertinência do Material Particulado 10	39
Figura 11 - Função de Pertinência da variável de saída QS1	39
Figura 12 - Função de Pertinência do índice do Sistema 1 QS1	40
Figura 13 - Função de Pertinência do Monóxido de Carbono.....	40
Figura 14 - Função de Pertinência da variável de saída QS2	41
Figura 15 - Função de Pertinência do índice do Dióxido de Nitrogênio.....	42
Figura 16 - Função de Pertinência do índice do Ozônio	43
Figura 17 - Função de Pertinência da variável de saída QS3	43
Figura 18 - Função de Pertinência do índice de Qualidade do Sistema 2	44
Figura 19 - Função de Pertinência do índice de Qualidade do Sistema 3	45
Figura 20 - Função de Pertinência da variável de saída QS4	46
Figura 21 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para MP _{2,5} em julho de 2022	53
Figura 22 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para MP10 em julho de 2022	54
Figura 23 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para O ₃ em fevereiro de 2022.....	55
Figura 24 - Gráfico do Relatório Anual da Cetesb para média anual do NO ₂ em 2022.....	56
Figura 25 - Descrição da medição de média de CO no ano de 2022.....	57

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S1	28
Quadro 2 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S2	29
Quadro 3 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S3	30
Quadro 4 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S4	31
Quadro 5- Cores usadas nas saídas dos sistemas S1, S2 e S3	50
Quadro 6 - Cores usadas para o sistema S4 – Índice da Qualidade Final do Ar	51

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Índice de Qualidade do Ar - Cetesb.....	33
Tabela 2 - Entrada do primeiro sistema S1.....	34
Tabela 3 - Entradas do segundo sistema S2	35
Tabela 4 - Entrada do terceiro sistema S3	35
Tabela 5 - Entradas do quarto sistema S4.....	36
Tabela 6- Saídas dos Sistemas S1, S2 e S3	37
Tabela 7 - Saída do sistema S4 (QS4)	38
Tabela 8 - Dados para análise no sistema Fuzzy	47
Tabela 9 - Dados Analisados registrados no Excel.....	49
Tabela 10 - Dados do Índice de Qualidade do Ar de cada Sistema	52

LISTA DE ABREVIATURAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FRBS	Fuzzy Ruled-Based System
GUI	Graphical User Interface
MMA	Ministério do Meio Ambiente
QS	Qualidade do Sistema
QAF	Qualidade do Ar Final
SBRF	Sistema Baseado em Regras Fuzzy

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 AMBIENTE DE ESTUDO	14
3.2 LÓGICA FUZZY APLICADA À ANÁLISE DE DADOS	15
3.3 LÓGICA FUZZY APLICADA AOS ESTUDOS AMBIENTAIS	16
4. METODOLOGIA	18
4.1 A Ferramenta Fuzzy	18
4.2 Construção do Sistema Fuzzy	20
4.3 ELABORAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA FUZZY	24
4.4 DESENVOLVIMENTO DAS REGRAS FUZZY	26
4.5 CONSTRUÇÃO DOS SISTEMAS FUZZY	34
4.6 Dados Obtidos	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Aplicação da Lógica Fuzzy	49
5.2 Análise dos Dados	51
5.2.1 Normalização dos dados	57
5.2.2 Índice de Qualidade do Sistema 1	57
5.2.3 Índice de Qualidade do Sistema 2	58
5.2.4 Índice de Qualidade do Sistema 3	58
5.2.5 Índice de Qualidade do Ar Final (Sistema 4)	59
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO A – Resolução CONAMA N° 491/2019	66
ANEXO B – Tabelas de Parâmetros da Cetesb	69
ANEXO C – Tabelas da Cetesb, na RMSP, com os dados completos de todos os gases estudados no trabalho	73

1. INTRODUÇÃO

A emissão de gases tóxicos e suas consequências, nas grandes cidades, para a saúde humana constituem uma forte preocupação no campo de atuação dos ambientalistas. No decorrer dos anos, várias nações passaram pelas etapas de desenvolvimento industrial e de urbanização (HEEDERIK, 2007). Esses processos têm como consequências o aumento de fatores que podem prejudicar a saúde da população que vive nas grandes cidades. Um fator muito importante para avaliar esses impactos na vida dos cidadãos, é a qualidade do ar (MARTIN, 2018).

Sabe-se que uma qualidade do ar ruim pode causar danos à saúde humana, tais como mal-estar, doenças respiratórias, e outras complicações que a longo prazo pode causar até a morte. Pode-se citar, por exemplo, casos de mortalidade total na população, malformações congênitas e menor ganho de peso durante a gestação, internações por asma em crianças e doença pulmonar obstrutiva crônica em idosos (Gouveia et al., 2006).

Pesquisas acerca da poluição atmosférica e seus impactos na saúde da população revelam que, mesmo quando os poluentes estão dentro dos limites estabelecidos pela legislação, podem ainda assim desencadear efeitos que prejudicam a saúde da população (Martins et al., 2002). Essa situação acaba por levantar ainda mais a necessidade da criação e implantação de métodos de análise que sejam capazes de avaliar a quantidade de gases tóxicos presentes na atmosfera, a fim de desenvolver um controle mais eficiente para a concentração desses poluentes em diferentes regiões. Essa discussão já foi estudada, onde o monitoramento correto da concentração desses poluentes no ambiente influencia a qualidade do ar, reduzindo seus impactos ambientais (MAY, 2012). Assim, há uma demanda por ferramentas úteis que possam avaliar com uma sistematização quantitativa e qualitativa a qualidade do ar em um determinado ambiente (JAVID, 2016; CAGLAYAN, 2017).

Essa problemática vigente, demanda uma ferramenta que possa trabalhar com um conjunto de dados e analisar o cenário da qualidade do ar, sendo esta a principal motivação para a realização desse trabalho. O presente trabalho trata, primeiramente, da análise das medidas destes poluentes nocivos e busca por uma metodologia eficiente para trabalhar com essas questões, de modo a propor um aperfeiçoamento em várias práticas dessa natureza.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma aplicação do sistema da Lógica Fuzzy na área ambiental, realizando uma análise da concentração de gases tóxicos presentes na atmosfera e, a partir desses dados, avaliar a qualidade do ar na cidade de São Paulo.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para atingir a meta de obter um sistema de análise com a Lógica Fuzzy, foi necessário organizar o desenvolvimento desse trabalho nas seguintes etapas:

- Obter e organizar dados do relatório anual da qualidade do ar da Cetesb
- Desenvolver uma linguagem numérica para trabalhar com as classificações da qualidade do ar no programa
- Criar um sistema de inferência, onde os gases serão separados em suas devidas classes toxicológicas, e uma classe específica para a qualidade do ar
- Programar, no software R, um sistema de inferência em linguagem Fuzzy, que irá analisar os dados obtidos e carregados no sistema
- Avaliar e analisar os resultados, em números e gráficos, para obter a qualidade do ar na cidade de São Paulo, com base na concentração dos gases tóxicos analisados

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AMBIENTE DE ESTUDO

No contexto do Brasil, um exemplo significativo para entender a questão das áreas urbanas é a Região Metropolitana de São Paulo, conhecida como Grande São Paulo, que atualmente abriga aproximadamente 21,5 milhões de habitantes. Portanto, essa região é caracterizada por uma alta densidade populacional, predominantemente urbana, e ainda enfrenta altos índices de poluição. A má qualidade do ar na Grande São Paulo representa um grave risco para a saúde da população, estando diretamente associada a uma variedade de doenças respiratórias. Isso é evidenciado no estudo de revisão sistemática conduzido por DAPPER et al. (2016), que investiga diversas cidades do estado de São Paulo.

Para dar início ao estudo toxicológico da qualidade do ar em São Paulo, será necessário compreender, primeiramente, a situação ambiental em que a cidade será estudada. No presente trabalho será considerada uma situação regular da cidade (sem algum fenômeno excepcional, como incêndios em suas proximidades), visando obter uma análise coerente com a situação do cotidiano.

No estado de São Paulo, tem-se uma agência governamental especializada e adequada para monitoramento e controle da poluição, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb). A Cetesb é responsável, ainda, pela fiscalização e licenciamento das fontes e atividades geradoras de poluição, bem como tem o objetivo de recuperar e preservar a qualidade da água, do solo e do ar. Neste trabalho, os objetos de estudo e de análise serão os gases categorizados como “poluentes primários”, uma vez que suas emissões vêm direto da fonte para o meio ambiente, de acordo com o MMA (2023).

Para melhor embasamento da descrição dos gases estudados, será usado o relatório da qualidade do ar do estado de São Paulo, feito pela Cetesb para o ano de 2022. Os poluentes que serão analisados neste trabalho são bem conhecidos pela população, tais como o gás Dióxido de Carbono. A importância se deve não apenas à sua toxicidade, mas também porque contam com a maior quantidade de dados disponíveis para análise, conforme relatado no documento anual da Cetesb, acessível no site oficial da companhia estadual.

Os principais poluentes que são parte dos estudos para avaliar a qualidade do ar pela Cetesb, na cidade de São Paulo, são Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Ozônio (O₃), Material Particulado 2,5 ou Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5}), Material Particulado 10 ou Partículas Inaláveis (MP₁₀). Certos gases, como o monóxido de carbono, e os materiais particulados, liberados durante no processo de queima de combustíveis fósseis, não apenas contribuem para mudanças climáticas, mas representam riscos significativos para a saúde humana, podendo desencadear sérios problemas respiratórios (POWER et al., 2018 L. C. CHEN e M. LIPPMANN, 2009). Ainda, de acordo com a Cetesb, os poluentes já classificados como Material Particulado (MP) formam um conjunto de poeiras, fumaça e material sólido e líquido, que estão suspensos na atmosfera. As fontes de sua emissão provêm, principalmente, de veículos, estruturas industriais e suspensão de poeira do solo. O tamanho das partículas desempenha um papel crucial, estando diretamente relacionado a impactos na saúde humana. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior o potencial desses efeitos adversos na população.

De acordo com o relatório da Cetesb de 2022, entre os gases de maior importância monitorados, destaca-se o ozônio, que é o mais volátil em termos de suas concentrações na atmosfera. Esse fenômeno decorre de suas interações com reações fotoquímicas, as quais são dependentes da luz solar. Observa-se que suas maiores concentrações ocorrem nas estações da primavera e verão. Além de ser classificado como um gás oxidante fotoquímico e representar riscos para a saúde, esse gás também pode causar danos à vegetação. Sua permanência mais segura ocorre a 25 km de altitude na atmosfera, atuando como um filtro de raios ultravioletas para proteger a superfície da terra da incidência direta da luz solar.

3.2 LÓGICA FUZZY APLICADA À ANÁLISE DE DADOS

Para o estudo e análise dos gases tóxicos na cidade de São Paulo, será necessário um conjunto amplo de dados para realizar uma análise confiável e cautelosa da concentração desses compostos, de modo a avaliar a qualidade do ar com bons critérios e em detalhes. Conforme descrito na Seção 2.2 deste trabalho, existe a necessidade de uma ferramenta capaz de trabalhar com essa situação, onde se busca avaliar qualitativamente uma grande quantidade de dados de maneira simples e objetiva. Para esse objetivo é que será aplicada a lógica fuzzy.

Essa ferramenta tem se revelado muito vantajosa na abordagem de questões ambientais, desempenhando diversas funções, incluindo a capacidade de modelar o índice de qualidade do ar e outros problemas envolvendo análise de qualidade. Essa capacidade de analisar grande quantidade de registros quantitativos pode ser evidenciada em dois estudos, de ZADEH (1965) e um estudo de JAVID (2016), mostrando sua eficácia independentemente da fonte dos dados.

O ponto de partida dessas pesquisas foi nos Estados Unidos, impulsionado por iniciativas de agências governamentais ambientais. Em etapas subsequentes, os pesquisadores continuaram avançando, elaborando abordagens de estudo relacionadas à inferência de sistemas lógicos matemáticos, voltadas para a manipulação de dados relativos à concentração de gases poluentes (SOWLAT, 2011).

A análise dos índices e parâmetros ambientais incorporados na lógica fuzzy, faz com que essa metodologia, que oferece dados claros para compreender as variáveis associadas e suas implicações no meio ambiente, se torne uma ótima opção para o estudo dessas variáveis. Tais implicações abrangem dados desde a qualidade do ar até desequilíbrios nos ecossistemas, com potenciais impactos na vida humana (MARRO, 2017; SILVERT, 2000).

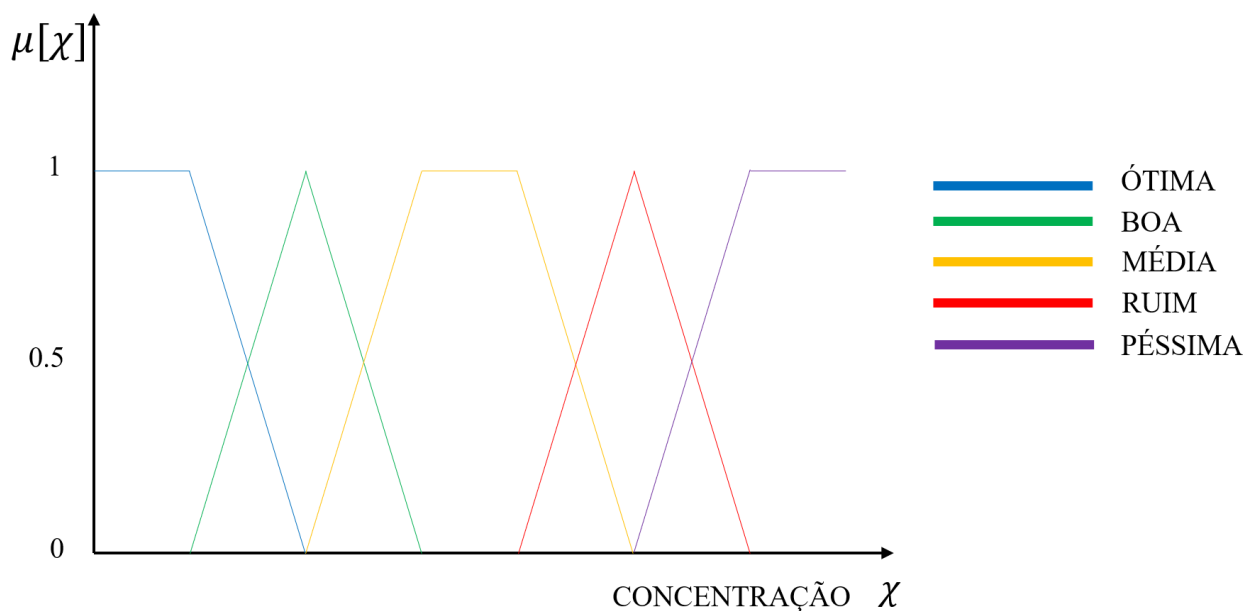
Não obstante, a lógica fuzzy tem estudos de aplicação, também no Brasil. Como é o caso da análise de probabilidade de erro humano em acidentes industriais, no caso nucleares (NASCIMENTO, 2010). Caso esse onde foi usada a lógica fuzzy, também com forte base nos estudos de fuzzy, mas aplicada à probabilidade por ZADEH (2011), discorrendo da necessidade de criação de uma ferramenta capaz de avaliar uma grande quantidade de dados e trabalhar com a questão da base de dados de erro humano.

3.3 LÓGICA FUZZY APLICADA AOS ESTUDOS AMBIENTAIS

Os tópicos relacionados a controle e monitoramento de gases tóxicos não são amplamente explorados nas disciplinas do curso de Engenharia Ambiental, mantendo-se, ainda, em fase de desenvolvimento na literatura científica. Entretanto, pode-se notar um empenho nas pesquisas para tratar das questões da qualidade do ar nas cidades e suas implicações na saúde pública. A justificação para a aplicação da lógica fuzzy neste projeto reside no fato de ser uma ferramenta amplamente utilizada em cálculos, construção de gráficos e programação, apresentando, assim,

potencial para o desenvolvimento de técnicas para monitoramento e análise de variáveis toxicológicas, tais como a concentração de gases estudados nesse trabalho, que são potencialmente prejudiciais à saúde humana.

Os estudos desenvolvidos por SILVERT (2000), já citado anteriormente neste trabalho, exploraram de maneira abrangente a combinação de conjuntos fuzzy, aplicando essa abordagem na identificação simplificada de diversos problemas ambientais, como a concentração de gases tóxicos, o consumo de oxigênio e a disponibilidade de nutrientes. Em projetos que envolvem uma complexa relação dessas variáveis, a lógica fuzzy proporciona uma representação mais simplificada dos dados estudados por meio de funções gráficas e tabelas, por exemplo. Essa abordagem, que faz uso dos de imagens, permite que os dados que representam a magnitude dos fatores estudados, como a quantidade de um gás, sejam analisados de uma maneira mais compreensível e eficiente, como pode ser observado na Figura 1 a seguir, havendo um índice de zero a um (nulo ao máximo) para um determinado valor de concentração.



Fonte: Autoria Própria

Figura 1- Função Fuzzy para Valores de Concentração

Além de compreender o uso da Função Fuzzy, é importante saber o porquê de sua aplicação e em que situações a mesma é mais viável. É a ressalva de que a questão de problemas com a qualidade do ar ainda é bem atual e acontece em várias nações além do Brasil. Até mesmo países desenvolvidos sofrem com um ar ruim nas grandes e médias cidades, como citado por JAVID (2016) e SOWLAT (2011), que serviu como base para o desenvolvimento desse trabalho. Ainda, os estudos de CAGLAYAN (2017) e VIEGAS (2011) mostram como a poluição do ar, devido aos gases tóxicos, pode atingir questões graves no âmbito socioeconômico das grandes cidades, como a segurança alimentar dos cidadãos. Especificamente, no estudo de VIEGAS (2011), aborda-se como a qualidade do meio ambiente rural e a saúde dos animais podem ter impactos diretos na qualidade da carne produzida em atividades de produção de determinados setores da área pecuária em Portugal.

No Brasil, são observados casos que relacionam a saúde dos animais à qualidade da carne na indústria pecuária, conforme demonstrado no estudo sobre diferenciação baseada na qualidade da carne bovina de OLIVEIRA (2008). Os pesquisadores neste artigo evidenciam como as condições ambientais e o manejo da saúde dos animais exercem um impacto direto na qualidade da carne durante o processo de obtenção do produto. O estudo destaca a importância de regras fundamentais, como o dimensionamento adequado do espaço e o controle ambiental, para garantir o bem-estar dos animais, incluindo práticas corretas de manejo do ambiente em que estão inseridos.

Finalmente, é importante destacar que a emissão de gases nocivos nas áreas urbanas é um problema significativo e em constante evolução. Este estudo tem o potencial de contribuir tanto para a área de engenharia quanto para a saúde pública. Além disso, pode servir como base para futuras pesquisas que buscam aprimorar o uso da Lógica Fuzzy no campo ambiental.

4. METODOLOGIA

4.1 A Ferramenta Fuzzy

O objetivo deste projeto é desenvolver um conjunto fuzzy simples baseado na técnica de SOWLAT (2011) e aplicá-lo em um sistema de controle de poluentes atmosféricos para fornecer valores e classificação. O sistema realizará a conversão de variáveis físicas, como concentração de

poluentes, em um conjunto de regras e algoritmos, resultando em uma classificação de um valor digital (baixo, médio ou alto). A simulação do sistema se dará para a cidade de São Paulo, utilizando dados fornecidos pela Cetesb (ANEXO C). O parâmetro de concentração de poluentes prejudiciais à saúde humana será utilizado para avaliar o índice de qualidade do ar por meio da ferramenta fuzzy, cujos resultados serão comparados com as avaliações da Cetesb. Esse processo permite obter uma avaliação sobre a eficiência da ferramenta fuzzy no monitoramento de poluentes atmosféricos. Uma vantagem significativa é que esse sistema pode oferecer uma classificação de dados com boa acurácia e de forma simplificada.

Os dados serão destacados em valores de entrada e de saída. As variáveis de entrada serão modeladas em expressões linguísticas, como Péssima, Muito Ruim, Ruim, Moderada, Boa. Os valores de entrada serão as características das variáveis, como a concentração de um poluente considerado prejudicial, que será representado por determinada variável linguística após a inferência (como "Ruim", por exemplo), com um intervalo especificado de acordo com os critérios estabelecidos pela Cetesb (ANEXO B). Os resultados representarão o índice de qualidade de cada poluente atmosférico até que todas as avaliações estejam concluídas, resultando na qualidade final do ar. Esse valor será determinado através de um conjunto de regras que combinará as variáveis de saída de dois sistemas, com poluentes mais tóxicos e os menos tóxicos.

É importante ressaltar que a metodologia desse trabalho pode se diferenciar dos cálculos realizados pelas normas dos padrões de qualidade do ar (Equação 1), estabelecida primeiramente pela CONAMA (ANEXO A). Desse modo, os valores trabalhados nos sistemas fuzzy serão já do relatório da Cetesb, com os dados devidamente medidos e registrados pela companhia.

Equação 1- Índice de Qualidade do Ar - CONAMA

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini})$$

4.2 Construção do Sistema Fuzzy

As variáveis utilizadas como parâmetro são os poluentes medidos, advindos do relatório da Cetesb. Essas variáveis serão compostas pelos principais poluentes atmosféricos detectados nos postos de medição na Região Metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP). A qualidade do ar pode ser analisada diariamente por meio do boletim diário, no site de serviços de qualidade do ar da Cetesb, como exemplificado no quadro de qualidade do ar nas estações e os pontos da capital de São Paulo, mostrados respectivamente nas Figuras 2 e 3. Os dados obtidos são referentes aos gases que puderam ser detectados e medidos pelos sistemas detecção por sensores da companhia.

Quadro Resumo da Situação das Estações					
Índice	Qualidade	Número de Estações			
		Capital	RMSP	Interior	Litoral
0 - 40	N1 - Boa	4	2	17	3
41 - 80	N2 - Moderada	14	7	10	1
81 - 120	N3 - Ruim	0	0	0	1
121 - 200	N4 - Muito Ruim	0	0	0	0
> 200	N5 - Péssima	0	0	0	0

Fonte: Boletim Diário da Cetesb

Figura 2 - Boletim Diário da qualidade do Ar Cetesb

CAPITAL	Qualidade	Índice	Poluente
Capão Redondo	N2 - Moderada	61	MP2.5
Cerqueira César	N2 - Moderada	43	MP10
Cid.Universitária-USP-Ipen	N1 - Boa	23	O3
Congonhas	N2 - Moderada	51	MP2.5
Grajaú-Parelheiros	N2 - Moderada	54	MP2.5
Ibirapuera	N2 - Moderada	42	MP2.5
Interlagos	N2 - Moderada	54	MP2.5
Itaim Paulista	N2 - Moderada	56	MP2.5
Itaquera	N1 - Boa	18	O3
Marg.Tietê-Pte Remédios	N2 - Moderada	73	MP2.5
Mooca	N2 - Moderada	65	MP2.5
N.Senhora do Ó	N1 - Boa	36	MP2.5
Parque D.Pedro II	N2 - Moderada	57	MP2.5
Perus	N2 - Moderada	55	MP10
Pico do Jaraguá	N1 - Boa	23	O3
Pinheiros	N2 - Moderada	59	MP2.5
Santana	N2 - Moderada	53	MP2.5
Santo Amaro	N2 - Moderada	59	MP2.5

Fonte: Boletim Diário da Cetesb

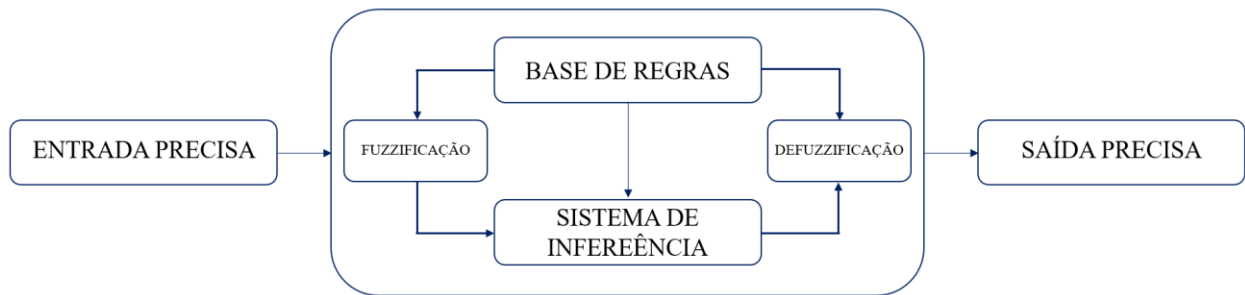
Figura 3 - Pontos da Capital e poluentes, medidos pela Cetesb

Os poluentes atmosféricos considerados para a análise do sistema são Ozônio (O3), Dióxido de Nitrogênio (NO2), Material Particulado 2,5 ou Partículas Inaláveis Finas (MP2,5), Material Particulado 10 ou Partículas Inaláveis (MP10) e Monóxido de Carbono (CO). Todas essas variáveis serão utilizadas como parâmetros para a determinação do índice de qualidade do ar, conforme os dados fornecidos pela Cetesb.

As variáveis foram desenvolvidas, adaptadas e implementadas no software R, que conta com o toolbox *fuzzyR* para a criação de sistemas baseados em regras. Essa escolha se mostrou muito interessante para o desenvolvimento do projeto, uma vez que o software é gratuito e permite a construção adequada das variáveis, além de facilitar a visualização dos gráficos utilizados para o mapeamento das regras fuzzy.

Para testar o sistema, foi realizada uma busca nos relatórios anuais da Cetesb, com o propósito de executar uma análise de dados. O sistema segue uma lógica de regras fuzzy, que lê a concentração dos poluentes e retorna um valor representativo da qualidade do ar.

Nesse trabalho, optou-se pelo Sistema de Inferência de Mamdani, conhecido como um dos sistemas de inferência fuzzy iniciais e mais importantes (NGUYEN et al., 2019). O processo de desenvolvimento desse sistema obedece a um conjunto de quatro etapas: Fuzzificação, Base de Regras, Sistema de Inferência e Defuzzificação. A Figura 4, inspirada em um modelo de uma dissertação de mestrado da Universidade de Thapar, na Índia (KARUN, 2009, p.20), fornece uma visão geral do Sistema Fuzzy que será construído neste trabalho.



Fonte: Autoria Própria

Figura 4 - Esquema de um Sistema Fuzzy

Na primeira etapa do processo, a fuzzificação dos dados, as variáveis são modeladas por meio de conjuntos fuzzy, que podem ser triangulares (Equação 2) ou trapezoidais (Equação 3).

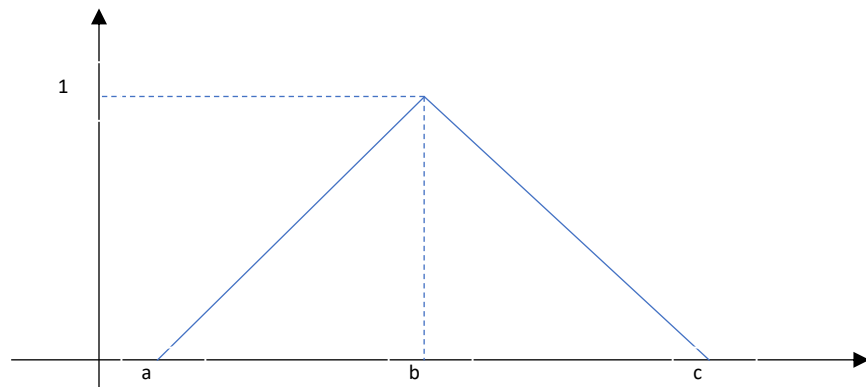
Equação 2 – Triangular

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x < b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{se } b \leq x < c \\ 0, & \text{se } x \geq c. \end{cases}$$

Equação 3 - Trapezoidal

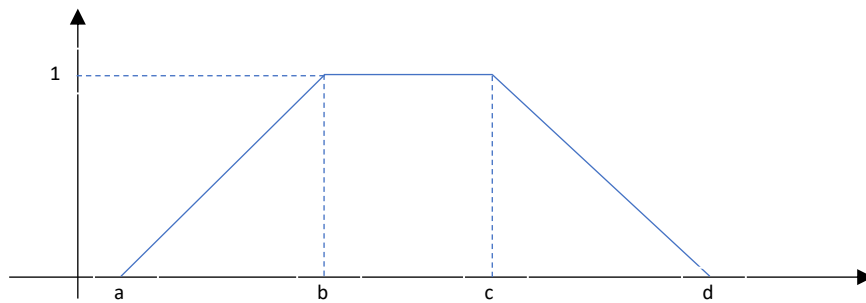
$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x < b \\ 1, & \text{se } b \leq x < c \\ \frac{x-d}{c-d}, & \text{se } c \leq x < d \\ 0, & \text{se } x \geq d \end{cases}$$

Graficamente, o conjunto fuzzy triangular e trapezoidal são representados nas Figuras 5 e 6 a seguir:



Fonte: Autoria Própria

Figura 5 - Função Triangular Fuzzy



Fonte: Autoria Própria

Figura 6 - Função Trapezoidal Fuzzy

Posteriormente, na segunda etapa foi construída a Base de Regras do sistema, que são do tipo “se”, “então”. A etapa de construção do conjunto requer o conhecimento de especialistas e, neste trabalho, o discente obteve auxílio de docentes do Curso de Engenharia Ambiental para a construção desta base de regras. Essa experiência foi extremamente enriquecedora para a formação do estudante, pois para elaborar as regras é necessário um profundo conhecimento das variáveis envolvidas e suas relações.

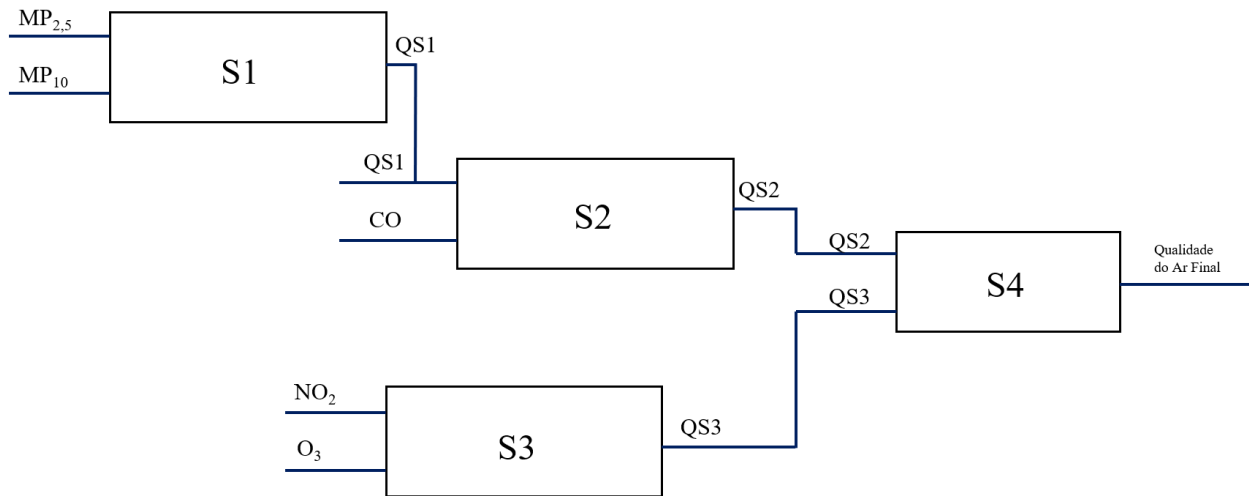
Finalmente, na terceira etapa, ocorre a seleção do sistema de inferência, utilizado para realizar os cálculos com base nas regras estabelecidas. O Defuzzificador retorna o valor de saída como interpretação do resultado do Sistema de Inferência. Nesse contexto, o Centróide foi escolhido como método de defuzzificação do conjunto fuzzy de saída, calculando o centro de gravidade e adotando esse valor como saída do sistema.

4.3 ELABORAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA FUZZY

Concluída a construção do sistema, foi feito um estudo utilizando simulações de cenários semelhantes aos observados no estudo de CAGLAYAN (2019). Este estudo utilizou os dados do relatório da Cetesb de 2022 e os incorporou ao arquivo R para testar a qualidade final do ar resultante da análise por inferência do sistema. Isso possibilitou uma avaliação cuidadosa dos aspectos positivos e negativos da modificação, com o intuito de determinar se ela seria viável para avaliar os níveis de poluentes atmosféricos nocivos e sua adequação às categorias de medição da qualidade do ar.

Durante a criação do sistema fuzzy, é essencial definir quais variáveis serão utilizadas para avaliação dos dados, havendo a necessidade de atribuir uma nomenclatura a elas durante a fase de desenvolvimento. Para isso, elas foram classificadas como "Variáveis Linguísticas". Posteriormente, foram incorporadas ao sistema fuzzy. Nesse sistema há duas entradas, com prioridade para a primeira (de cima), pois essa terá uma condição mais rigorosa para a criação das regras do sistema futuramente. No total, foram desenvolvidos quatro sistemas, cada um com duas

variáveis, totalizando oito no conjunto completo de sistemas, conforme ilustrado na Figura 7 a seguir.



Fonte: Autoria Própria

Figura 7 - Sistemas Fuzzy criados

Nesse sistema as seguintes nomenclaturas valem como:

- S1: Sistema 1, contendo os Materiais Particulados 2,5 e 10 como variáveis de entrada e uma variável de saída correspondente à qualidade do ar no Sistema 1, chamada de QS1. Importante ressaltar a necessidade da ordem de entrada, pois o $MP_{2,5}$ tem maior impacto do que o MP_{10} , pois é um conjunto de partículas menores
- S2: Sistema 2, contendo a qualidade do ar do sistema 1 como valor de entrada (QS1) e o Monóxido de Carbono, também como variável de entrada. A saída é a qualidade do ar do Sistema 2, chamada de QS2. Assim como no caso anterior, reforça-se a necessidade de respeitar a ordem das entradas no Sistema 2, dando prioridade ao resultado da saída do Sistema 1 (QS1) e depois o CO, pois o Sistema 1 tem os gases mais tóxicos do conjunto.

- S3: Sistema 3, contém as concentrações dos gases Dióxido de Nitrogênio e Ozônio. A saída é a qualidade do ar do Sistema 3, chamada de QS3.
- S4: Sistema 4, contém as qualidades do sistema 2 e 3 como valores de entrada (QS2 e QS3), a saída é classificada como QAF (Qualidade do Ar Final) para a saída QS4. Como já observado nos casos anteriores, o peso do resultado do Sistema 2 é maior por conter os poluentes mais tóxicos, portanto deverá ser a primeira entrada do sistema.

Como se pode observar na Figura 7, os sistemas fuzzy criados para a construção do conjunto obedecem a uma ordem de análise. O Sistema 1 contém os poluentes mais tóxicos, que são os materiais particulados. Já o Sistema 2, que ainda contém um gás extremamente tóxico (Monóxido de Carbono) mescla o resultado do Sistema 1 (QS1) e cria um novo conjunto, os dos gases mais tóxicos, cujo resultado dependerá, primeiramente, índice QS1 e depois da concentração de CO. A construção se dará assim, pois como já explicado na Seção 3.1 desse trabalho, esses são os poluentes mais cruciais e perigosos para a saúde humana e, portanto, devem ter um peso maior no sistema para avaliar o índice de qualidade do ar, sendo a primeira entrada do Sistema S4. Já o Sistema 3 terá os gases menos tóxicos (embora não deixem de ser nocivos à saúde humana) do conjunto e serão avaliados como a segunda entrada no sistema final S4.

4.4 DESENVOLVIMENTO DAS REGRAS FUZZY

Para realizar uma avaliação apropriada das variáveis pelo software R, foi necessário estabelecer uma base de regras específica para cada uma delas. Cada regra implica na ponderação do valor numérico (neste caso, a concentração de cada gás na atmosfera) conforme a função lógica “and”, permitindo assim uma análise precisa. A melhor maneira de ponderar quais sistemas teriam maior impacto no valor final da inferência fuzzy, foi pesquisando quais são os poluentes atmosférico mais prejudiciais à saúde e classificá-los nos sistemas com regras mais rigorosas. Dessa maneira, os sistemas S1 e S2, por conterem os poluentes mais prejudiciais, têm uma base de regras mais rigorosa e seu impacto é maior, do cálculo realizado pela lógica fuzzy, no resultado das saídas.

Vale ressaltar que a qualidade do sistema 1, QS1, tem praticamente o mesmo “peso” para o sistema em que o monóxido de carbono (CO) está inserido (S2) para o cálculo do índice de qualidade do ar do Sistema 2. Isso se deve ao número de variáveis linguísticas, que é cinco, pois

poderia diminuir o impacto do CO no cálculo final, o que não é muito coerente, a menos que fossem criadas mais variáveis. Não obstante, a prioridade do conjunto ainda é dos materiais particulados, mas as regras do sistema dão o mesmo peso tanto para QS1 quanto CO. Entretanto, se fossem criadas mais regras (com seis ou mais variáveis linguísticas, por exemplo), o peso seria diferente, e QS1 teria um impacto pelas regras fuzzy numericamente maior no resultado da saída QS2 do que o CO.

Antes de trabalhar com as variáveis, é necessário criar uma base de regras para que o R possa executar a lógica do sistema fuzzy e analisar os dados corretamente. Pensando nisso, foi criado um conjunto de regras de todos os sistemas de entrada e de saída. Os valores de entrada variam de “boa” a “péssima”, numericamente do 1 ao 5. Enquanto os de saída variam de “muito bom” a “tóxico”, numericamente do 1 ao 7. A construção dessas regras, antes de ser aplicada no R, foi planejada no Excel, como mostram os Quadros 1 ao 4 a seguir. É importante notar que foi feita para cada sistema um conjunto de regras de variável linguística e numérica.

Quadro 1 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S1

S1: MP 2,5 e MP 10					
Variáveis Linguísticas			Variáveis Numéricas		
MP 2.5	MP10	Qualidade S1 (QS1)	MP 2.5	MP10	Qualidade S1 (QS1)
boa	boa	muito bom	1	1	1
	moderada	bom		2	2
	ruim	moderado		3	3
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
moderada	boa	bom	2	1	2
	moderada	moderado		2	3
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
ruim	boa	moderado	3	1	3
	moderada	ruim		2	4
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
muito ruim	boa	ruim	4	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
péssima	boa	ruim	5	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	péssimo		4	6
	péssima	tóxico		5	7

Quadro 2 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S2

S2: QS1 e CO					
Variáveis Linguísticas			Variáveis Numéricas		
QS1	CO	Qualidade S2 (QS2)	QS1	CO	Qualidade S2 (QS2)
boa	boa	muito bom	1	1	1
	moderada	bom		2	2
	ruim	moderado		3	3
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
moderada	boa	bom	2	1	2
	moderada	moderado		2	3
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
ruim	boa	moderado	3	1	3
	moderada	ruim		2	4
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
muito ruim	boa	ruim	4	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
péssima	boa	ruim	5	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	péssimo		4	6
	péssima	tóxico		5	7

Quadro 3 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S3

S3: NO2 e O3					
Variáveis Linguísticas			Variáveis Numéricas		
NO2	O3	Qualidade S3 (QS3)	NO2	O3	Qualidade S3 (QS3)
boa	boa	muito bom	1	1	1
	moderada	bom		2	2
	ruim	moderado		3	3
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
moderada	boa	bom	2	1	2
	moderada	moderado		2	3
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
ruim	boa	moderado	3	1	3
	moderada	ruim		2	4
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
muito ruim	boa	ruim	4	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
péssima	boa	ruim	5	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	péssimo		4	6
	péssima	tóxico		5	7

Quadro 4 - Variáveis Linguísticas e Numéricas do Sistema S4

S4: QS2 e QS3					
Variáveis Linguísticas			Variáveis Numéricas		
QS2	QS3	Qualidade Final do Ar	QS2	QS3	Qualidade Final do Ar
boa	boa	muito bom	1	1	1
	moderada	bom		2	2
	ruim	moderado		3	3
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	ruim		5	4
moderada	boa	moderado	2	1	3
	moderada	moderado		2	3
	ruim	ruim		3	4
	muito ruim	ruim		4	4
	péssima	muito ruim		5	5
ruim	boa	ruim	3	1	4
	moderada	ruim		2	4
	ruim	muito ruim		3	5
	muito ruim	muito ruim		4	5
	péssima	péssimo		5	6
muito ruim	boa	ruim	4	1	4
	moderada	muito ruim		2	5
	ruim	péssimo		3	6
	muito ruim	tóxico		4	7
	péssima	tóxico		5	7
péssima	boa	muito ruim	5	1	5
	moderada	péssimo		2	6
	ruim	tóxico		3	7
	muito ruim	tóxico		4	7
	péssima	tóxico		5	7

O princípio para essa lógica é: “Dado o primeiro sistema S1, se um valor de concentração de um primeiro gás tóxico (entrada 1) é “a” e o segundo (entrada 2) é “b”, então o valor do índice de qualidade do ar desse primeiro sistema (saída 1) será “c”. Um exemplo de como essa lógica é aplicada no R pode ser visto na Figura 8 a seguir, que mostra as regras do Sistema S1.

Type-1 Fuzzy Logic : Sistema1

Number of input': 2

Number of output': 1

Select input / output variable: MP2,5

Evaluate FIS

☒ Reset

☐ evalfis()

Exit

Membership Function Rules Defuzzifier

1. If (MP2,5 is boa) and (MP10 is boa) then (Qualidade S1 is muito bom) (1)
2. If (MP2,5 is boa) and (MP10 is moderado) then (Qualidade S1 is bom) (1)
3. If (MP2,5 is boa) and (MP10 is ruim) then (Qualidade S1 is moderado) (1)
4. If (MP2,5 is boa) and (MP10 is muito ruim) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
5. If (MP2,5 is boa) and (MP10 is pessimo) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
6. If (MP2,5 is moderado) and (MP10 is boa) then (Qualidade S1 is bom) (1)
7. If (MP2,5 is moderado) and (MP10 is moderado) then (Qualidade S1 is moderado) (1)
8. If (MP2,5 is moderado) and (MP10 is ruim) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
9. If (MP2,5 is moderado) and (MP10 is muito ruim) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
10. If (MP2,5 is moderado) and (MP10 is pessimo) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
11. If (MP2,5 is ruim) and (MP10 is boa) then (Qualidade S1 is moderado) (1)
12. If (MP2,5 is ruim) and (MP10 is moderado) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
13. If (MP2,5 is ruim) and (MP10 is ruim) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
14. If (MP2,5 is ruim) and (MP10 is muito ruim) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
15. If (MP2,5 is ruim) and (MP10 is pessimo) then (Qualidade S1 is pessimo) (1)
16. If (MP2,5 is muito ruim) and (MP10 is boa) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
17. If (MP2,5 is muito ruim) and (MP10 is moderado) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
18. If (MP2,5 is muito ruim) and (MP10 is ruim) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
19. If (MP2,5 is muito ruim) and (MP10 is muito ruim) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
20. If (MP2,5 is muito ruim) and (MP10 is pessimo) then (Qualidade S1 is pessimo) (1)
21. If (MP2,5 is p?ssimo) and (MP10 is boa) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
22. If (MP2,5 is p?ssimo) and (MP10 is moderado) then (Qualidade S1 is ruim) (1)
23. If (MP2,5 is p?ssimo) and (MP10 is ruim) then (Qualidade S1 is muito ruim) (1)
24. If (MP2,5 is p?ssimo) and (MP10 is muito ruim) then (Qualidade S1 is pessimo) (1)
25. If (MP2,5 is p?ssimo) and (MP10 is pessimo) then (Qualidade S1 is toxico) (1)

Figura 8 - Regras do Sistema S1 no R

Após criar o sistema de lógica de regras para o R, foi necessário buscar uma referência para construir o índice de qualidade do ar e dividir as viráveis em classificações (funções de pertinência). A própria Cetesb tem os seus parâmetros estabelecidos: "Péssimo", "Muito Ruim", "Ruim", "Moderada" e "Boa", como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Índice de Qualidade do Ar - Cetesb

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2,5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h
N1 – Boa	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200
N2 – Moderada	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240
N3 – Ruim	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320
N4 – Muito Ruim	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130

Fonte: Cetesb – Padrões de Qualidade do Ar

Como resultado, cada gás teve cinco funções de pertinência, o que implicou na necessidade de criar vinte e cinco regras para o sistema completo, composto por cinco gases.

As figuras do próximo tópico mostram como foram criadas as regras em cada sistema com os intervalos referentes à Tabela 1 da Cetesb. Por exemplo o primeiro sistema, chamado de S1 contém as variáveis dos materiais particulados e a sua saída será a qualidade do ar com esses dois gases ponderados e devidamente analisados com as condições estabelecidas na base de regras. O mesmo vale para os demais sistemas.

4.5 CONSTRUÇÃO DOS SISTEMAS FUZZY

Para a construção do sistema, é importante categorizar os intervalos de cada variável, permitindo a análise dos dados. Utilizando os parâmetros da Cetesb (ANEXO B) como referência, foram estabelecidos os intervalos para cada gás, classificando-os de acordo com as funções de pertinência da Cetesb, conforme demonstrado na Tabela 2, que representa as entradas de cada sistema.

Tabela 2 - Entrada do primeiro sistema S1

1º Sistema						
S1	MP2,5					
	Variável Linguística	a	b	c	d	Intervalo
	Boa	0	0	12.5	25	0-25
	Moderada	12.5	25	37.5	50	25-50
	Ruim	37.5	50	62.5	75	50-75
	Muito Ruim	62.5	75	100	125	75-125
	Péssima	100	125	125	125	>125
	MP10					
	Variável Linguística	a	b	c	d	Intervalo
	Boa	0	0	25	50	0-50
	Moderada	25	50	75	100	50-100
	Ruim	75	100	125	150	100-150
	Muito Ruim	125	150	200	250	150-250
	Péssima	200	250	250	250	>250

Tabela 3 - Entradas do segundo sistema S2

2º Sistema						
S2	QS1					
	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo	
	Boa	0	0	2.5	0-2.5	
	Moderada	0	2.5	5	0-5	
	Ruim	2.5	5	7.5	2.5-7.5	
	Muito Ruim	5	7.5	10	5-10	
	Péssima	7.5	10	10	7.5-10	
	CO					
	Variável Linguística	a	b	c	d	Intervalo
	Boa	0	0	4.5	9	0-9
	Moderada	4.5	9	10	11	9-11.
	Ruim	10	11	12	13	11-13.
	Muito Ruim	12	13	14	15	13-15.
	Péssima	14	15	15	15	>15

Tabela 4 - Entrada do terceiro sistema S3

3º Sistema						
S3	NO2					
	Variável Linguística	a	b	c	d	Intervalo
	Boa	0	0	100	200	0-200
	Moderada	100	200	220	240	200-240
	Ruim	220	240	280	320	240-320
	Muito Ruim	280	320	725	1130	320-1130
	Péssima	725	1130	1130	1130	>1130
	O3					
	Variável Linguística	a	b	c	d	Intervalo
	Boa	0	0	50	100	0-100
	Moderada	50	100	115	130	100-130
	Ruim	115	130	145	160	130-160
	Muito Ruim	145	160	180	200	160-200
	Péssima	180	200	200	200	>200

Tabela 5 - Entradas do quarto sistema S4

4º Sistema					
S4	QS2				
	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
	Boa	0	0	2.5	0-2.5
	Moderada	0	2.5	5	0-5
	Ruim	2.5	5	7.5	2.5-7.5
	Muito Ruim	5	7.5	10	5-10
	Péssima	7.5	10	10	7.5-10
	QS3				
	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
	Boa	0	0	2.5	0-2.5
	Moderada	0	2.5	5	0-5
	Ruim	2.5	5	7.5	2.5-7.5
	Muito Ruim	5	7.5	10	5-10
	Péssima	7.5	10	10	7.5-10

Ainda, tem-se as tabelas para as saídas dos sistemas, que representam o índice de qualidade do ar para cada um. A “Qualidade do Ar Final”, última variável de saída (do sistema S4), que será calculada pelo R com as regras do conjunto Fuzzy para cada sistema inserido, é o índice final de qualidade do ar. Ele será usado para avaliar se o ar da cidade de São Paulo é tóxico, péssimo, muito ruim, ruim, moderado, bom ou muito bom. As classificações “Muito bom” e “Tóxico” foram adicionadas para trabalhar com os cenários mais extremos, como um onde ambas as entradas fossem o melhor valor possível (Bom) ou pior valor (Péssimo). Os valores dos intervalos do sistema QS4, tomam como base o índice de qualidade do ar desenvolvido pela Cetesb, como pode ser visto na íntegra no ANEXO B desse trabalho.

Tabela 6- Saídas dos Sistemas S1, S2 e S3

Qualidade do Ar do Sistema S1					
QS1	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
	Muito Bom	0	0	1	0-1
	Bom	0	1	3	0-3
	Moderado	1	3	5	1-5
	Ruim	3	5	7	3-7
	Muito Ruim	5	7	9	5-9
	Péssimo	7	9	10	7-10
	Tóxico	9	10	10	9-10

Qualidade do Ar do Sistema S2					
QS2	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
	Muito Bom	0	0	1	0-1
	Bom	0	1	3	0-3
	Moderado	1	3	5	1-5
	Ruim	3	5	7	3-7
	Muito Ruim	5	7	9	5-9
	Péssimo	7	9	10	7-10
	Tóxico	9	10	10	9-10

Qualidade do Ar do Sistema S3					
QS3	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
	Muito Bom	0	0	1	0-1
	Bom	0	1	3	0-3
	Moderado	1	3	5	1-5
	Ruim	3	5	7	3-7
	Muito Ruim	5	7	9	5-9
	Péssimo	7	9	10	7-10
	Tóxico	9	10	10	9-10

Tabela 7 - Saída do sistema S4 (QS4)

Qualidade do Ar do Final					
	Variável Linguística	a	b	c	Intervalo
QS4	Muito Bom	0	0	20	0-20
	Bom	0	20	60	0-60
	Moderado	20	60	100	20-100
	Ruim	60	100	140	60-140
	Muito Ruim	100	140	180	100-180
	Péssimo	140	180	200	140-200
	Tóxico	180	200	200	180-200

Para um melhor desenvolvimento da metodologia desse trabalho, se faz de grande utilidade a visualização gráfica dos dados que serão trabalhados, ferramenta essa que o software R proporciona com o comando “showGUI” do programa. Para melhor demonstração desse conjunto foram criadas imagens GUI no R para cada sistema dos gases tóxicos e suas respectivas saídas, podendo-se observar como as regras foram entendidas pelo R, respeitando também os intervalos fornecidos, como se pode ver nas Figuras 9 a 20.

- Gráficos das Funções de Pertinência do Sistema 1

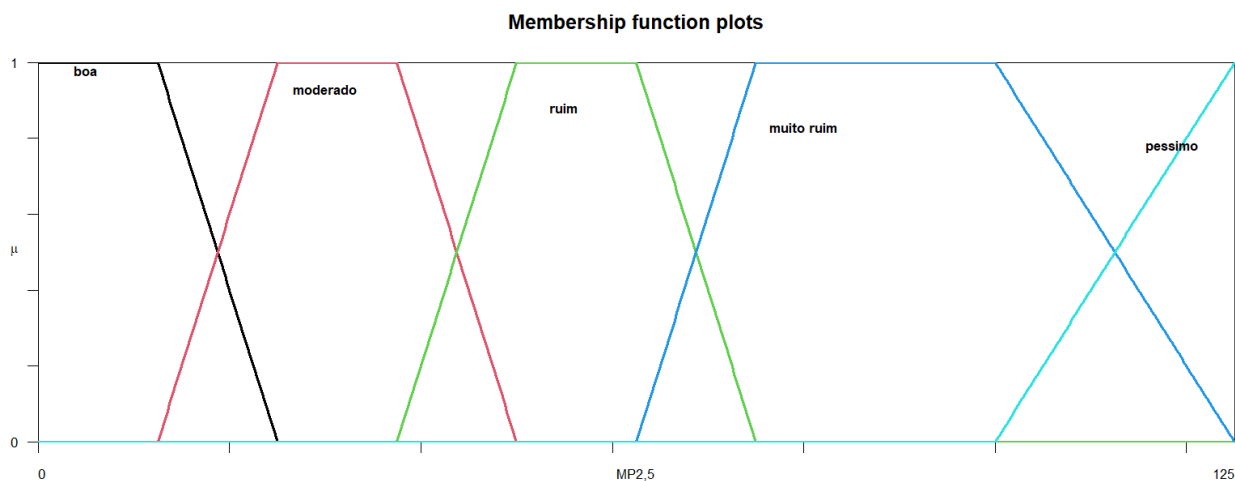


Figura 9 - Função de Pertinência do Material Particulado 2,5

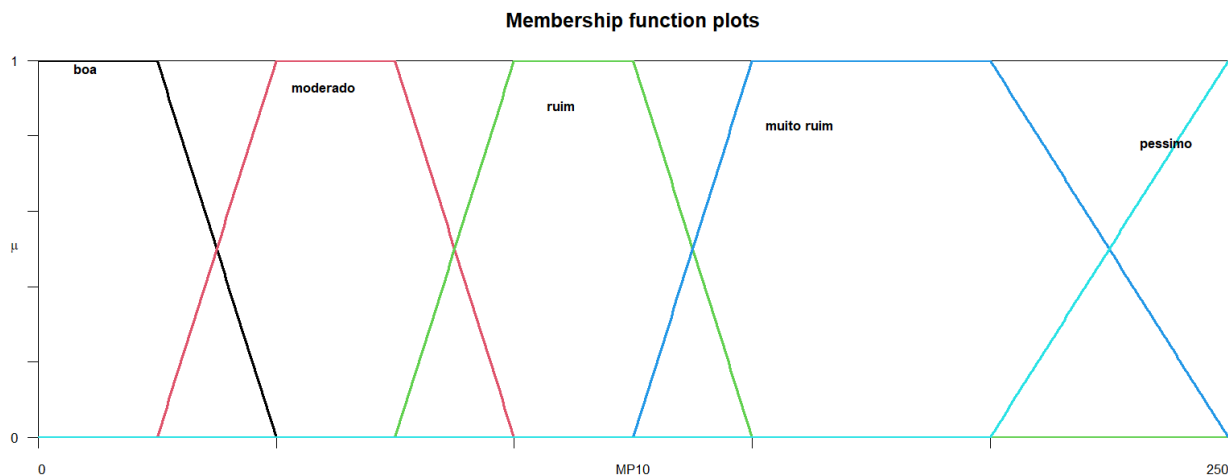


Figura 10 - Função de Pertinência do Material Particulado 10

As Figuras 9 e 10 representam as entradas do primeiro sistema S1, onde é possível notar as entradas dos materiais particulados e seus respectivos intervalos, MP 2,5 [0, 125] e MP10[0, 250].

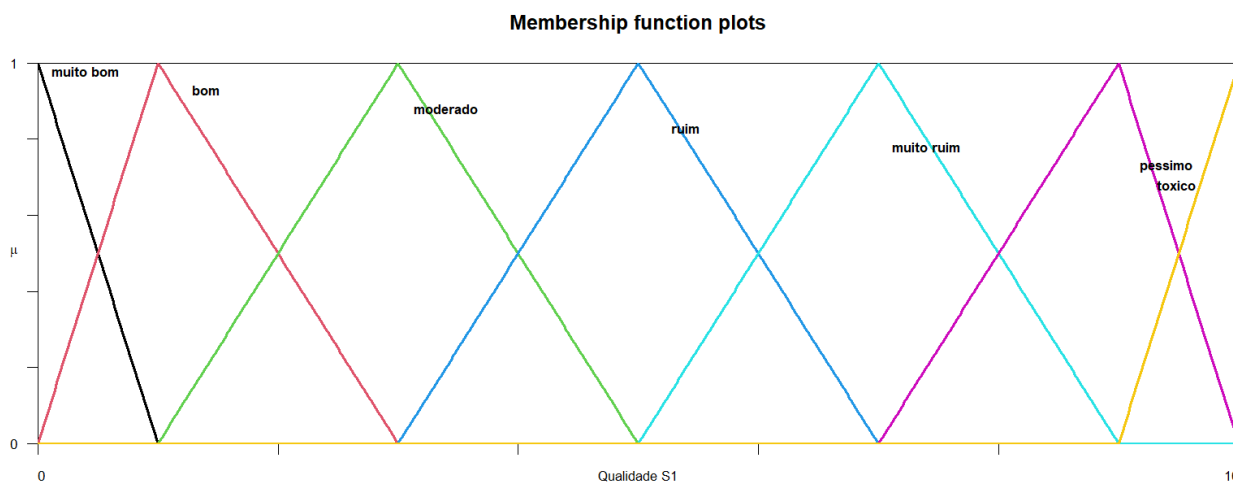


Figura 11 - Função de Pertinência da variável de saída QS1

Esse gráfico representa a variável de saída “Qualidade S1” (QS1), onde é possível notar as sete variáveis linguísticas de saída e seu universo de discurso, com os intervalos para QS1 de [0, 10].

- Gráficos das Funções de Pertinência do Sistema 2

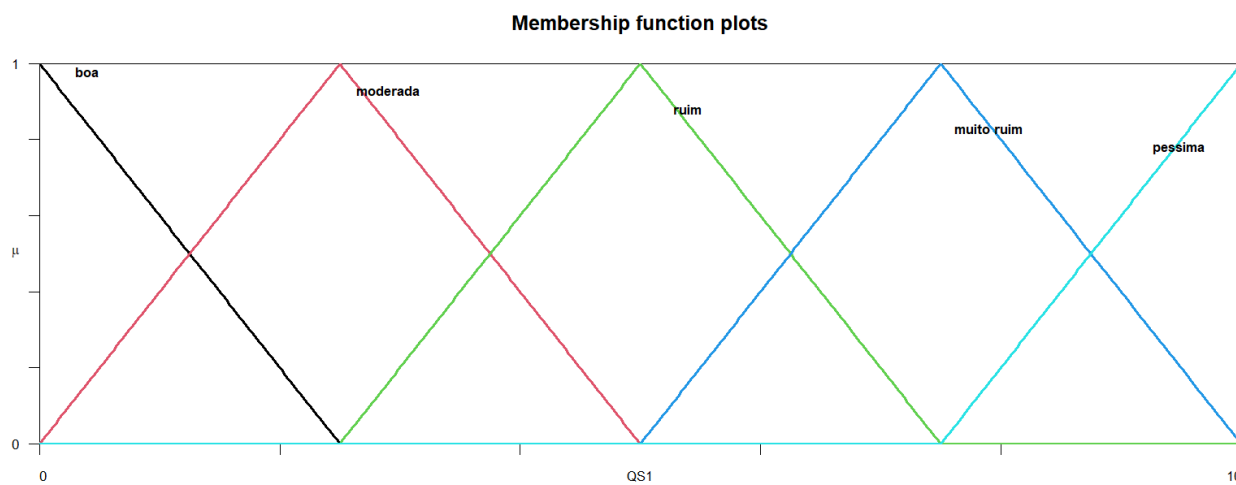


Figura 12 - Função de Pertinência do índice do Sistema 1 QS1

A Figura 12 representa a primeira variável de entrada, a “QS1” (Qualidade do Sistema 1), onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para QS1 de [0, 10].

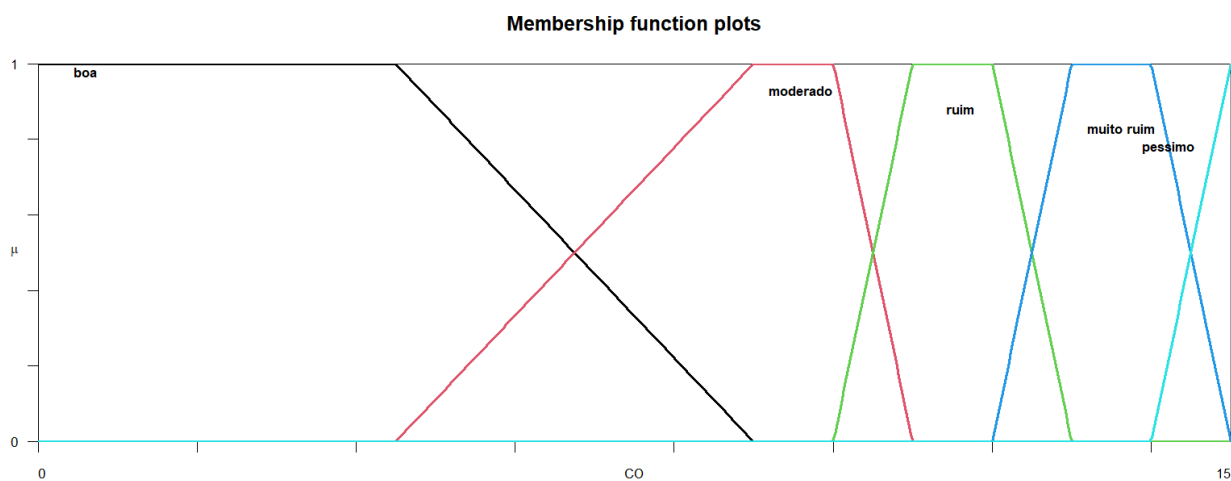


Figura 13 - Função de Pertinência do Monóxido de Carbono

A Figura 13 representa a segunda variável de entrada “CO” (Monóxido de Carbono), onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para CO de [0, 15].

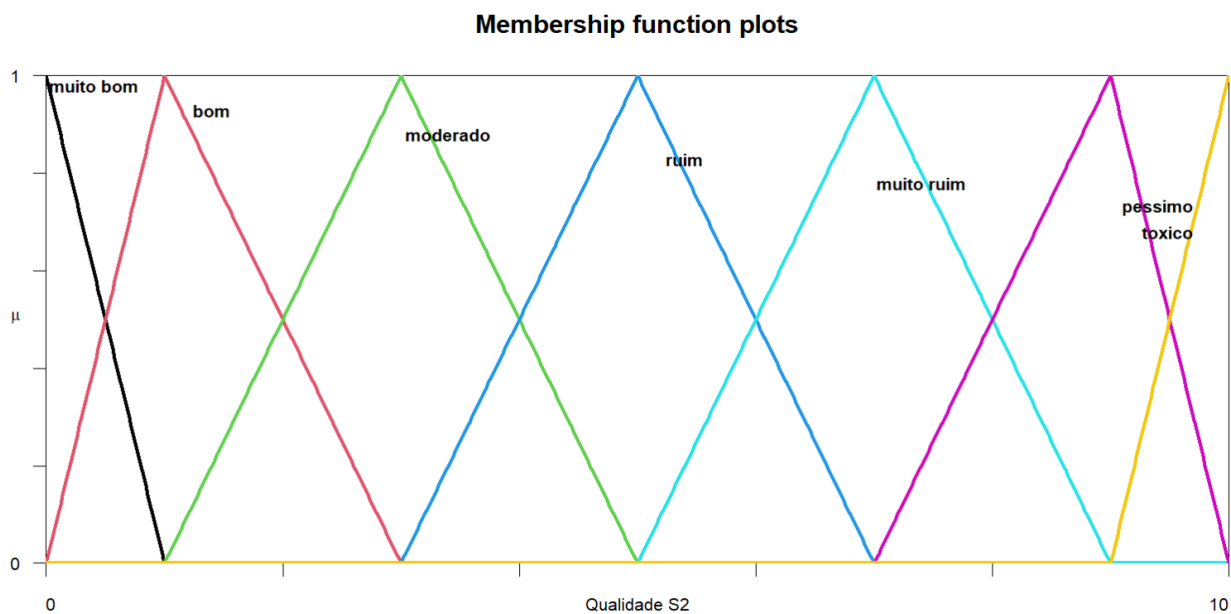


Figura 14 - Função de Pertinência da variável de saída QS2

A Figura 14 representa a variável de saída “Qualidade S2” (QS2), onde é possível notar as sete variáveis linguísticas de saída e seu universo de discurso, com os intervalos para QS2 de [0, 10].

- Gráficos das Funções de Pertinência do Sistema 3

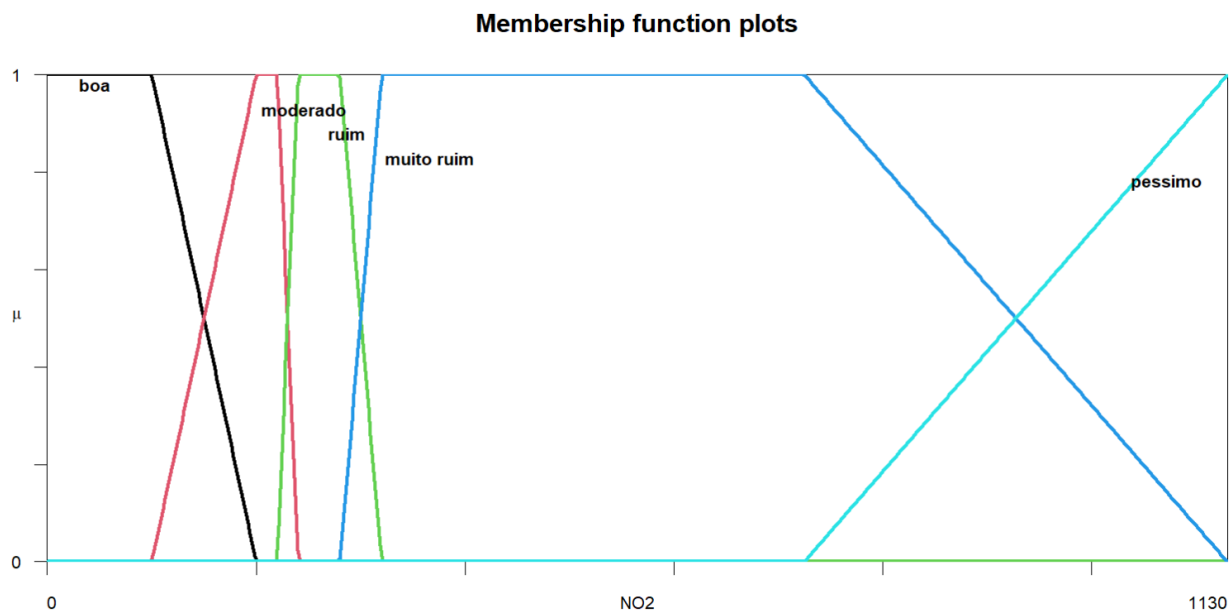


Figura 15 - Função de Pertinência do índice do Dióxido de Nitrogênio

A Figura 15 representa a primeira variável de entrada, o “ NO_2 ”, onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para NO_2 de $[0, 1130]$.

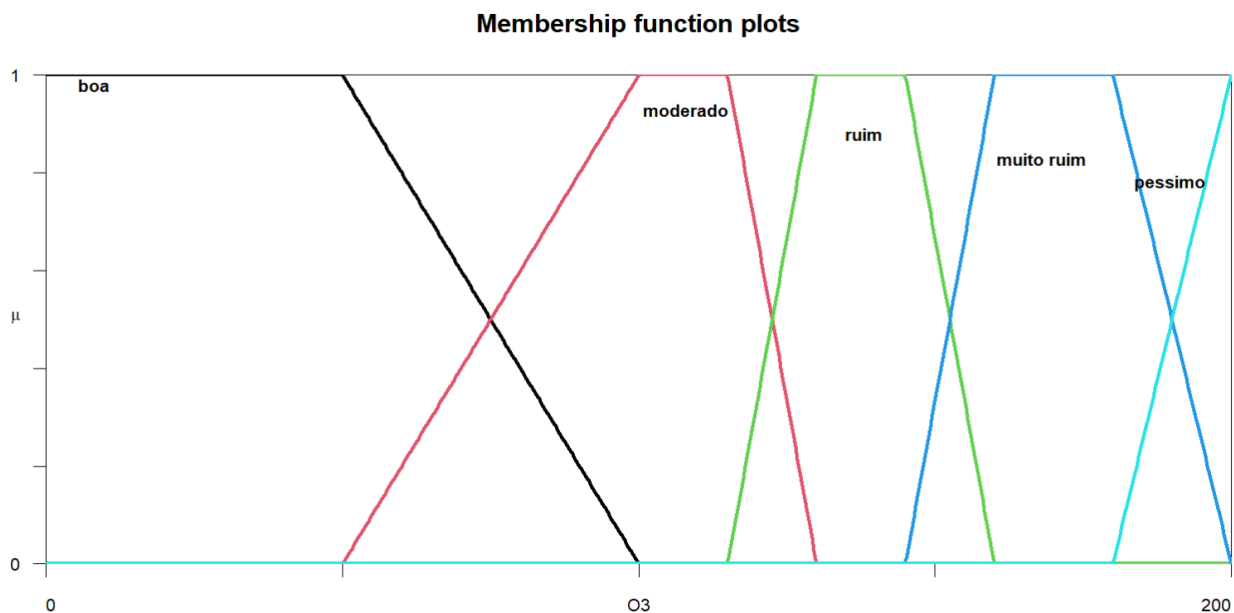


Figura 16 - Função de Pertinência do índice do Ozônio

A Figura 16 representa a primeira variável de entrada, o “O₃”, onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para O₃ de [0, 200].

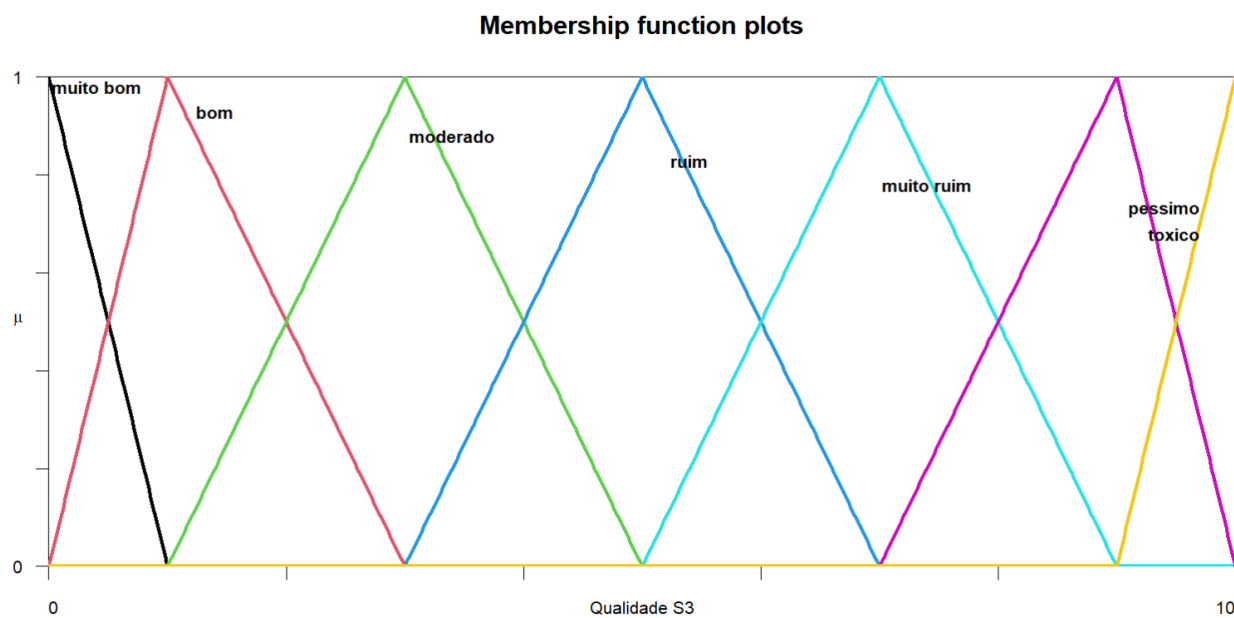


Figura 17 - Função de Pertinência da variável de saída QS3

A Figura 17 representa a variável de saída “Qualidade S3” (QS3), onde é possível notar as sete variáveis linguísticas de saída e seu universo de discurso, com os intervalos para QS3 de [0, 10].

- Gráficos das Funções de Pertinência do Sistema 4

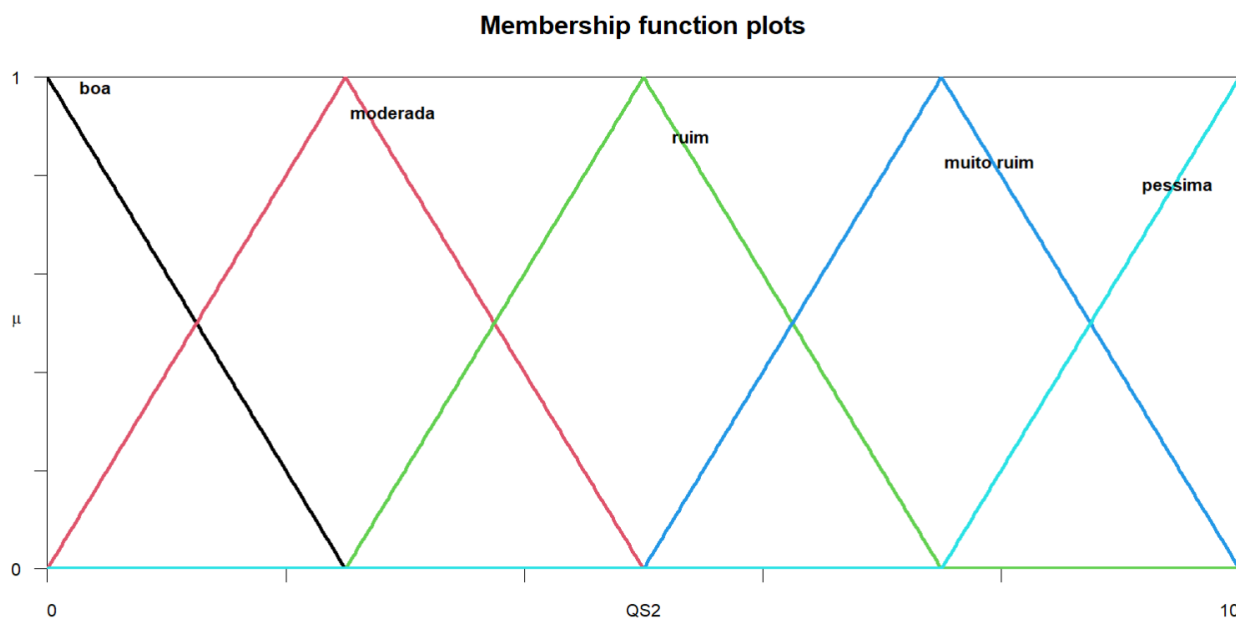


Figura 18 - Função de Pertinência do índice de Qualidade do Sistema 2

A Figura 18 representa a primeira variável de entrada, a “QS2” (Qualidade do Sistema 2), onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para QS2 de [0, 10].

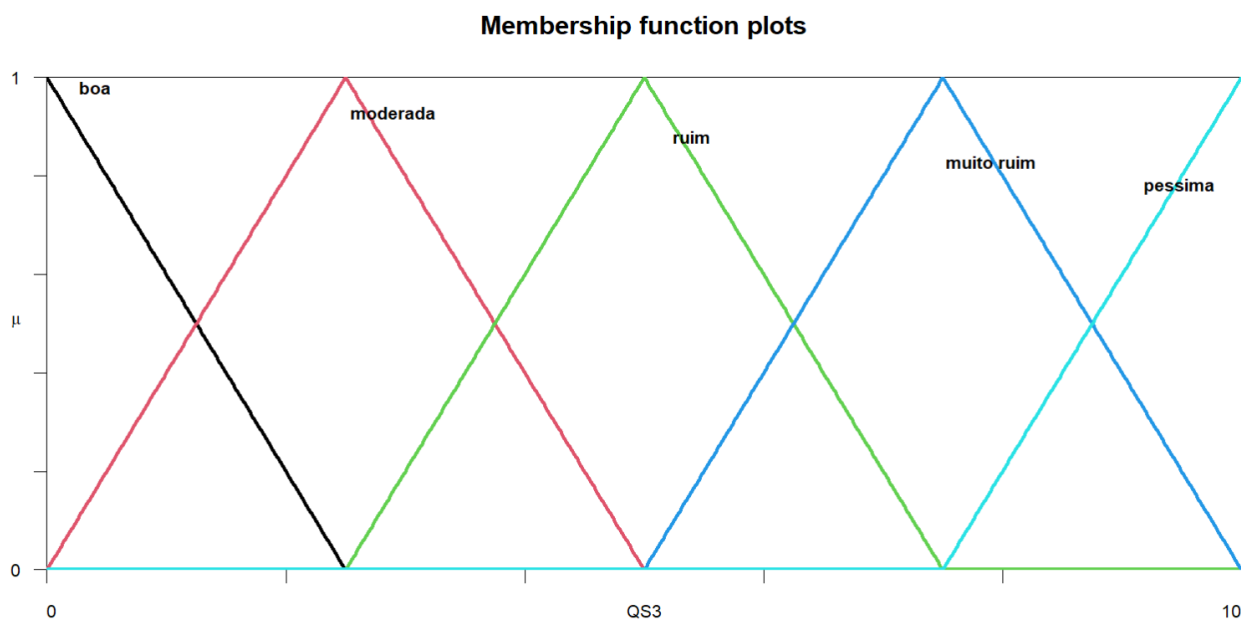


Figura 19 - Função de Pertinência do índice de Qualidade do Sistema 3

A Figura 19 representa a segunda variável de entrada, a “QS3” (Qualidade do Sistema 3), onde é possível notar as cinco variáveis linguísticas de entrada e seu universo de discurso, com os intervalos para QS3 de [0, 10].

Para completar a informação dos conjuntos fuzzy, tem-se uma demonstração do gráfico construídos do índice de qualidade do ar definitivo, que engloba todos os poluentes analisados, como apresentado na Figura 20. A saída se dá como a “Qualidade Ar do Final”, projetada pelo R:

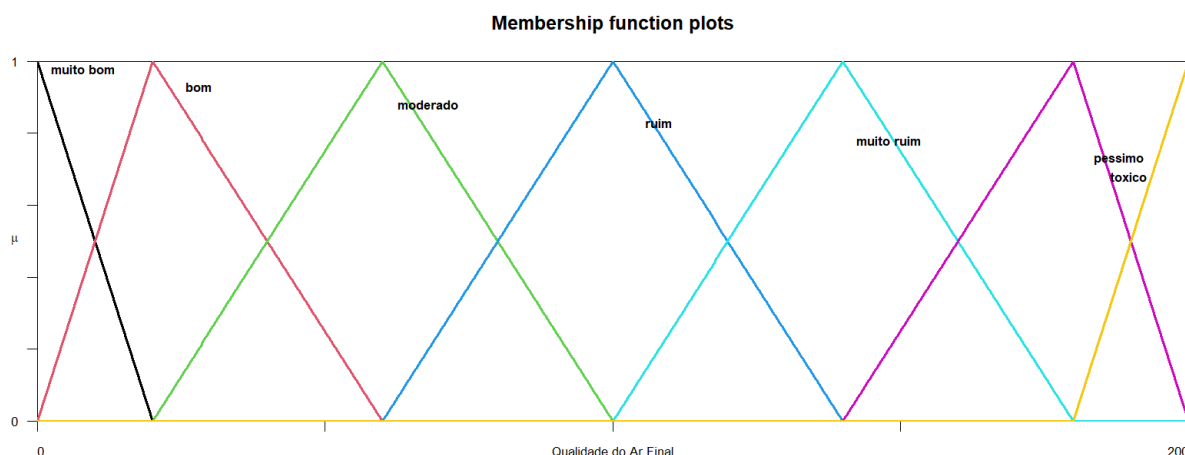


Figura 20 - Função de Pertinência da variável de saída QS4

A Figura 20 representa a variável de saída “Qualidade do Ar Final” (QS4), onde é possível notar as sete variáveis linguísticas de saída e seu universo de discurso, com os intervalos para QS4 de [0, 200]. Importante ressaltar que esse intervalo segue os parâmetros da Cetesb para a atribuição do índice de qualidade do ar, como mostrado no ANEXO B desse trabalho.

4.6 Dados Obtidos

Para realizar a análise da concentração dos gases tóxicos em São Paulo no R, será necessário obter uma base de dados de confiança. Para isso, optou-se por utilizar os dados do relatório da CETESB de 2022, podendo ser checado na íntegra no ANEXO C desse trabalho.

Ainda, é necessário utilizar uma grande quantidade de medições obtidas, de modo que o trabalho tenha uma quantidade sólida de dados e possibilite uma análise mais correta e precisa para calcular o índice de qualidade do ar da cidade. Para isso serão inseridos dados de vários períodos diferentes do ano para as mesmas cidades, assim possibilitando a obtenção de um valor médio e podendo calcular a Qualidade do Ar Final.

A Tabela 7 a seguir, com os dados registrados no Excel, apresenta as medições de cada gás utilizado nesse estudo e que será colocada para análise no programa R.

Tabela 8 - Dados para análise no sistema Fuzzy

Local (RMSP)	Local Mais Próximo	Dia de Medição	Relatório Cetesb 2022				
			MP 2,5 (pág. 118)	MP 10 (pág. 117)	CO (pág. 133)	NO2 (pág. 131)	O3 (pág. 128)
São Caetano do Sul	São Caetano do Sul	1	19	33	5,4	27	134
		2	24	46	5,4	27	76
		3	32	53	5,4	27	80
		4	38	57	5,4	27	74
		5	30	52	5,4	27	77
		6	28	47	5,4	27	102
		7	29	47	5,4	27	93
		8	29	61	5,4	27	129
		9	15	36	5,4	27	123
		10	12	20	5,4	27	81
Congonhas	Ibirapuera (O3)	1	20	31	4,9	66	134
		2	28	58	4,9	66	92
		3	38	54	4,9	66	109
		4	34	62	4,9	66	79
		5	31	62	4,9	66	91
		6	33	65	4,9	66	117
		7	32	62	4,9	66	103
		8	34	81	4,9	66	136
		9	20	44	4,9	66	132
		10	12	20	4,9	66	99
Taboão da Serra	São Bernardo Centro (MP 2,5)	1	17	29	4,3	22	110
		2	21	66	4,3	22	62
		3	28	57	4,3	22	64
		4	29	53	4,3	22	63
		5	28	55	4,3	22	63
	Interlagos (NO2) e Diadema (O3)	6	25	44	4,3	22	108
		7	28	39	4,3	22	96
		8	25	79	4,3	22	121
		9	14	45	4,3	22	123
		10	7	18	4,3	22	76

No registro dos dados, utilizou-se a tabela de concentrações medidas disponível no relatório anual da Cetesb para o ano de 2022. Para cada poluente foi feita a inserção de dez medições, do primeiro dia de medição até o décimo do mesmo mês e ano. Alguns gases, como o caso do NO₂ e CO, não tinham medição por dia no relatório e foi utilizada a média anual. Ainda, foram escolhidas 3 regiões da cidade de São Paulo, onde foram feitas as medições pela Cetesb. Ainda, foram selecionados trinta dados para cada poluente (cento e cinquenta no total), tendo assim uma distribuição melhor e mais precisa das medições na cidade de São Paulo. Alguns gases não tinham dados nas regiões escolhidas, então foram selecionadas regiões secundárias próximas ao local primeiramente escolhido para a maioria dos gases que tinham esses dados, com exceção de São Caetano do Sul.

As regiões podem ser ditas como:

- Região 1: São Caetano do Sul
- Região 2: Congonhas e Ibirapuera
- Região 3: Taboão da Serra, São Bernardo Centro, Interlagos e Diadema

Para os poluentes atmosféricos MP_{10} , $MP_{2,5}$, e O_3 foram utilizados dados das respectivas tabelas de suas concentrações. É importante ressaltar que a ordem dos dados foi disposta em relação ao primeiro dia de medição até o décimo dia

Já para os gases NO_2 e CO , os dados foram obtidos a partir de uma média tirada ao longo do ano na região de São Paulo. É importante ressaltar que, conforme a Tabela 7 mostrada anteriormente, esses gases foram monitorados em locais próximos à escolha principal (onde também foi feito o monitoramento pela Cetesb) e têm menos variações nos seus valores medidos.

Finalmente, no momento em que os dados forem inseridos no R, haverá uma análise de todas as medições feitas para cada poluente atmosférico de uma vez. Isto é, o programa irá analisar os trinta registros (das três regiões) de cada poluente e retornará um único valor de índice qualidade do ar para o mesmo. Posteriormente, os cinco índices serão analisados em conjunto pelo sistema Fuzzy e será retornado um valor final da qualidade do ar, onde o cálculo levará em consideração todos os poluentes analisados no sistema (MP_{10} , $MP_{2,5}$, CO , NO_2 e O_3).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicação da Lógica Fuzzy

Os dados da Cetesb apresentados na Tabela 7, da Seção 4.6 desse trabalho foram ordenados e simplificados em uma planilha à parte (em formato .csv), que serve para o R executar a leitura de dados de uma matriz (colunas ordenadas no Excel) e aplicar as regras fuzzy programadas corretamente. Deu-se o nome da planilha de “RDadosTCC” (Tabela 8) e foi usada a função “as.matrix(read.csv("RDadosTCC.csv",header=T))” para ler a planilha no software R.

Tabela 9 - Dados Analisados registrados no Excel

	mp 2,5	mp10	co	no2	o3
	0	0	0	0	0
	125	250	15	1130	200
1	19	33	5.4	27	134
2	24	46	5.4	27	76
3	32	53	5.4	27	80
4	38	57	5.4	27	74
5	30	52	5.4	27	77
6	28	47	5.4	27	102
7	29	47	5.4	27	93
8	29	61	5.4	27	129
9	15	36	5.4	27	123
10	12	20	5.4	27	81
11	20	31	5.4	66	134
12	28	58	5.4	66	92
13	38	54	5.4	66	109
14	34	62	5.4	66	79
15	31	62	5.4	66	91
16	33	65	5.4	66	117
17	32	62	5.4	66	103
18	34	81	5.4	66	136
19	20	44	5.4	66	132
20	12	20	5.4	66	99
21	17	29	5.4	22	110
22	21	66	5.4	22	62
23	28	57	5.4	22	64
24	29	53	5.4	22	63
25	28	55	5.4	22	63
26	25	44	5.4	22	108
27	28	39	5.4	22	96
28	25	79	5.4	22	121
29	14	45	5.4	22	123
30	7	18	5.4	22	76

É importante ressaltar que cada coluna representa os poluentes na ordem dos sistemas analisados (do S1 ao S4) e cada linha o dia de medição (do primeiro ao décimo) para cada região, como explicado na Seção 4.6 desse trabalho. Isto é, as dez primeiras linhas são da Região 1, as próximas da linha 11 ao 20 são da Região 2, e as últimas da linha 21 a 30 são da Região 3.

Posteriormente foi usada a função “evalfis” para aplicar as regras fuzzy e avaliar os resultados da concentração dos gases de cada sistema (S1, S2, S3 e S4). Além disso, para cada conjunto, foi feita normalização dos dados com a função “normalize”, advinda do sistema “normalize.r”, que foi devidamente programada e registrada no arquivo. Acabado o processo de análise, usou-se a função “cbind” para juntar todos os dados analisados (normalizados e não normalizados) em uma única planilha, denominada “DADOSTCCCOMPLETO.csv”

Os dados analisados foram dispostos em uma única planilha do excel e essa foi devidamente preparada para ser apresentada nesse trabalho. Para melhor compreensão, os dados foram simplificados para duas casas decimais e os resultados foram mostrados com cores, de maneira semelhante a que o R utilizou automaticamente na geração dos gráficos, como os mostrado na Seção 4.5 desse trabalho. Foi construída uma tabela contendo os dados devidamente analisados pelo R, onde as células representam a qualidade do ar para cada sistema com uma banda de cores (Quadro 5) selecionada pelo próprio autor do projeto. Isso inclui a qualidade do ar final (QS4), que considera o índice de qualidade do ar levando em conta todos os gases tóxicos analisados.

Quadro 5- Cores usadas nas saídas dos sistemas S1, S2 e S3

Saídas dos sistemas S1, S2 e S3				
Banda de Cores		Variável Linguística	Intervalo	Novo Intervalo
Verde		muito bom	0-1	0-1
Verde-claro		bom	0-3	1-2.6
Amarelo		moderado	1-5	2.6-4.2
Laranja		ruim	3-7	4.2-5.8
Vermelho		muito ruim	5-9	5.8-7.4
Vermelho-escuro		péssimo	7-10	7.4-9
Roxo		tóxico	9-10	9-10

Quadro 6 - Cores usadas para o sistema S4 – Índice da Qualidade Final do Ar

Saída do sistema S4 - Qualidade do Ar Final				
Banda de Cores		Variável Linguística	Intervalo	Novo Intervalo
Verde		muito bom	0-20	0-20
Verde-claro		bom	0-60	20-52
Amarelo		moderado	20-100	52-84
Laranja		ruim	60-140	84-116
Vermelho		muito ruim	100-180	116-148
Vermelho-escuro		péssimo	140-200	148-180
Roxo		tóxico	180-200	180-200

É importante ressaltar que uso das cores servem para simplificar visualmente a análise dos dados, mas não representam precisamente os valores da lógica fuzzy, uma vez que seus valores de saída trabalham com todos os números possíveis dentro de um intervalo, sendo inviável criar uma cor para todas as saídas possíveis. Por exemplo, seguindo a lógica do sistema de saídas, a saída do índice de qualidade do ar do Sistema 1 (QS1) com o valor 1 está dentro do intervalo para ser considerado de qualidade “Boa” (verde-claro) e “Moderada” (amarelo). Porém, esta tende mais para “Boa” se estiver abaixo de 3 e “Moderada” se estiver entre 3 e 5. Um valor mais preciso e específico, como 2,1 poderia ser interpretado como “moderadamente bom” e um valor de 1,1 como “essencialmente bom”. Sendo assim, o número de banda de cores poderia ser ilimitado. Para efeito de praticidade, nesse trabalho será usada apenas a quantidade correspondente com o número de variáveis para as saídas dos sistemas (QS1, QS2, QS3 e QS4), isto é, sete (Muito Bom, Bom, Moderado, Ruim, Muito Ruim, Péssimo e Tóxico). Isso será feito porque a saída corresponde ao índice de qualidade do ar, levando em conta a concentração de todos os gases analisados no sistema.

5.2 Análise dos Dados

A seguir, está a Tabela 9, contendo os dados devidamente organizados e classificados de maneira simples para o melhor entendimento do índice de qualidade do ar.

Tabela 10 - Dados do Índice de Qualidade do Ar de cada Sistema

Local	Dia	QS1	QS1N	QS2	QS2N	QS3	QS3N	QS4	QS4N
		0.3	0	0.3	0	0.3	0	6	0
		9.7	10	9.7	10	9.7	10	194	200
Região 1	1	2.05	1.87	1.85	1.65	3.00	2.87	59.68	57.11
	2	2.80	2.66	2.14	1.95	1.25	1.01	53.14	50.15
	3	3.00	2.87	2.43	2.27	1.28	1.04	57.00	54.26
	4	3.11	2.99	2.57	2.42	1.23	0.99	58.93	56.31
	5	3.00	2.87	2.43	2.27	1.26	1.02	57.03	54.29
	6	2.85	2.72	2.23	2.05	1.33	1.10	54.11	51.19
	7	2.85	2.72	2.23	2.05	1.32	1.09	54.14	51.21
	8	3.00	2.87	2.43	2.27	2.92	2.79	63.69	61.37
	9	1.85	1.65	1.85	1.65	2.43	2.26	51.59	48.49
	10	0.30	0.00	0.96	0.71	1.28	1.05	40.16	36.34
Região 2	1	1.93	1.73	1.85	1.65	3.00	2.87	59.69	57.12
	2	3.00	2.87	2.43	2.27	1.32	1.09	56.95	54.20
	3	3.11	2.99	2.57	2.42	1.33	1.10	58.88	56.26
	4	3.00	2.87	2.43	2.27	1.27	1.03	57.01	54.27
	5	3.00	2.87	2.43	2.27	1.32	1.08	56.95	54.20
	6	3.00	2.87	2.43	2.27	1.73	1.52	57.07	54.33
	7	3.00	2.87	2.43	2.27	1.33	1.10	56.93	54.18
	8	3.56	3.47	2.80	2.66	3.00	2.87	72.49	70.74
	9	2.47	2.31	1.87	1.67	3.00	2.87	59.88	57.32
	10	0.30	0.00	0.96	0.71	1.33	1.10	40.13	36.31
Região 3	1	1.75	1.54	1.85	1.65	1.33	1.10	49.38	46.15
	2	2.62	2.46	1.88	1.68	1.03	0.77	50.71	47.57
	3	3.00	2.87	2.43	2.27	1.08	0.83	57.21	54.47
	4	3.00	2.87	2.43	2.27	1.05	0.80	57.23	54.49
	5	3.00	2.87	2.43	2.27	1.05	0.80	57.23	54.49
	6	2.71	2.57	1.99	1.80	1.33	1.10	51.08	47.96
	7	2.46	2.30	1.87	1.67	1.33	1.09	49.62	46.41
	8	3.40	3.30	2.73	2.58	2.24	2.06	61.90	59.46
	9	1.68	1.46	1.85	1.65	2.43	2.26	51.60	48.51
	10	0.30	0.00	0.96	0.71	1.25	1.01	40.19	36.37

Como mostrado na tabela, os dados são das saídas de todos os sistemas e correspondem à qualidade do ar de cada um. A análise desses dados pode ser feita por tópicos, desse modo será possível discutir os resultados de cada sistema individualmente. Para efeito de comparação, serão usados os dados da Cetesb, cujas páginas dos números registrados estão na Tabela 8, Seção 4.6 desse trabalho. Portanto, o raciocínio de comparação será usar as dez linhas de cada região comparando com os dez primeiros dias da coleta de dados. Por exemplo, na Figura 21 e 22, tem-se os dados do MP_{2,5} e do MP₁₀, que já estão com o índice da qualidade do ar classificados de

acordo com as normas da Cetesb, demonstrado na íntegra no ANEXO B. A comparação pode ser feita com o dado 1 da coluna do sistema QS1N que é de 1.87 com os 21 de julho, de 19 e 33, do MP_{2,5} e do MP₁₀ respectivamente. Como será detalhado a seguir, a comparação dos dados será feita somente considerando as colunas normalizadas.

	RMSP																				INTERIOR e LITORAL																	
Data	Cerqueira César (M)	Cid. Universitária-USP-Ipen	Congonhas	Grajaú-Parelheiros	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Ibirapuera	Itaim Paulista	Marg. Tietê-Ponte dos Remédios	Mauá	Mooca	Osasco	Parque D. Pedro II	Perus	Pico do Jaraguá	Pinheiros	S. Bernardo-Centro	Santana	Santo Amaro (M)	Santo André - Capuava (M)	São Caetano do Sul	Campinas-V. União	Guaratinguetá	Jundiaí	Limeira	Paulínia-Sta Terezinha	Piracicaba	Ribeirão Preto	Rio Claro-Jd. Guanabara	S. José Campos-Jd. Satélite	Santa Gertrudes	Santos-Ponta da Praia	São José do Rio Preto	São Sebastião	Taubaté			
21-jul-22		16	20	18	19	19	18	19	24	16	15	22	17	18	13	19	17	18		19		16	13	23	15	17			11	28	12	22	5	12				
22-jul-22		33	28	32	36	43	28	38	49		31	46	36	23	15	36	21	34	31	29	24		18	25	20	21	23		20	34	19	21	8	17				
23-jul-22		40	38	41	38	54	33	41	45		39	42	39	27	20	40	28	35		32		18	27	23	27	24		25	41	25	23	10	19					
24-jul-22		41	34	38	47	46	33	49	51		36	49	40	38	28	43	29	51		38		21	34	23	28	27		26	35	25	21	19	22					
25-jul-22		36	31	34	32	37	33	34	45		32	42	37	32	22	39	28	41		30		21	29	23	26	23		20	36	26	23	16	18					
26-jul-22		35	33	23	40	37	32	36	43	31	32	45	35	35	27	38	25	40		28		18	34	29	29	32		20	43	20	28	15	19					
27-jul-22		29	32	31	33	33	32	31	31	29	26	34	28	31	23	31	28	31		29		22	26	36	27	28		23		14	32		23					
28-jul-22	31	33	34	34	33	36	32	39	44	30	31	44	33	28	19	35	25	33	27	23	29		17	33	29	32	29	36	20		26	26		18				
29-jul-22		14	20	14	13	17	15	21	23	19	15	24	14	14	15	13	14	18		15	20	15	25	19	20	19		27	17		12	21	13	17				
30-jul-22		8	12	6	16	15	10	12	13	9	11	12	13	11	10	10	7	15		12	14	14	14	13	12	11	16	14	9		10	16	8	9				
31-jul-22		14	15	12	18	16	15	15	17	11	13	19	14	18	13	16	12	15		12	19	13	16	20	15	17	28	25	11		7	21	8	13				
01-ago-22		22	24	24	25		22	28	28	27	22	28	24	26	15	27	21	22		21	26	18	22	22	31	19	40	37	18		13	27	13	16				
02-ago-22		31	38	32	33	26	33	39	43	42	37	40	39	31	16	41	30	33		39	38	19	25	29	25	22	44	39	22		19	48	15	17				
03-ago-22	30	31	32	20	40	33	31	32	37	26	28	38	34	32	26	31	25	39	23	29	32	34	20	29	29	26	27	31	53	18		22	34	12	18			
04-ago-22		33	30	39	25	26	29	31	44	34	28	43	29	29	19	34	27	29		27	31	25	27	29	27	31	33	44	25		22	29	16	24				
05-ago-22		19	24	18	33	28	19	25	27	24	20	33	23	20	16	24	20	24		24	26	20	33	29	29	26	39	29	21	36	18	28	19	17				
06-ago-22		9	12	8	10	9	8	9	11	7	9	15	12	14	11	11	7	14		8	15		14	18	13	16		20	5	28	9	33	8	9				
07-ago-22		11	12	12	12	10	12	11	11	13	10	12	11	11	8	14	11	13		12	13	15	12	18	20	11	43	25	9	22	9	26	8	15				

Figura 21 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para MP_{2,5} em julho de 2022

Data	RMSP																		
	Capão Redondo	Carapicuíba	Cerqueira César	Congonhas	Diadema	Grajaú-Paralelos	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Interlagos	Itaim Paulista	Marg.Tietê-Ponte dos Remédios	Mauá	Nossa Senhora do Ó	Osasco	Parque D.Pedro II	Perus	Pinheiros	S.André-Capuaia	S.Bernardo-Paulicéia
21-jul-22	34	39	30	31	28	42	39	39	33	30	40	48	30	47	26	46	37	39	36
22-jul-22	52	58	48	44	38	71	68	82	48	56	73		45	77	81	60	55	50	45
23-jul-22	51	54	56	64	45	84	66	93	68	63	68		51	65		58	58	69	57
24-jul-22	56	62	45	48	41	75	76	74	67	67	67		53	63	79	67	55	51	59
25-jul-22	54	62	50	53	44	75	58	67	60	50	68		54	68	72	63	54	59	54
26-jul-22	39	65	48	61	39	47	71	67	40	59	72	54	57	71	62	80	51	49	48
27-jul-22	49	62	49	54	39	61	60	62	45	47	53	37	47	62	52	71	48	53	53
28-jul-22	70	81	65	67	55	85	74	81	64	73	80	54	64	81		71	67	60	62
29-jul-22	30	44	35	39	30	41	40	46	35	39	45	34	38	52	36	46	36	39	31
30-jul-22	14	20	12	21	16	17	26	29	15	18	21	19	23	27	26	27	22	24	19
31-jul-22	24	28	24	23	20	25	35	30	24	22	27	18	23	29	23	30	24	24	26
01-ago-22	37	42	37	37		50	39	47	39	39	45	37	34	45	52	47	37	53	35
02-ago-22	49	54	53	58		64	55	67	56	55	64	79	66	68	82	70	57	64	57
03-ago-22	45	57	49	48		48	67	66	35	48	60	46	52	59	68	73	51	53	44
04-ago-22		73	58	56		108	49	60	56	56	74	53	54	81	67	70	69	59	55
05-ago-22	45	51	42	47		52	65	62	41	45	59	49	48	67	67	56	46	52	49
06-ago-22	13	25	17	19		23	21	21	14	22	18	10	21		24	33	20	15	16
07-ago-22		25	19	18		24	18	21	17	17	18	19	18		30	20	20	15	20

Figura 22 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para MP10 em julho de 2022

Data	RMSP																			
	Capão Redondo	Carapicuíba	Cid. Universitária-USP-Ipen	Diadema	Grajau-Parelheiros	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Ibirapuera	Interlagos	Itaim Paulista	Itaquera	Mauá	Mooça	Nossa Senhora do Ó	Parque D. Pedro II	Perus	Pico do Jaraguá	Pinheiros	S. André-Capuava	S. Bernardo-Centro
14-fev-22	118	77	144	110	84	125	144	134		159		155	143	108	125	111	111	102	152	132
15-fev-22	72	75		62	55	84	97	92	41	91	82	72	104	90	96	131	128	77	81	72
16-fev-22	92	99	105	64	57	79	80	109	43	80	76	64	105	100	98	141	128	95	73	67
17-fev-22	87	56		63	60	61	75	79	41	82	81	74	75	68	67	78	77	48	73	74
18-fev-22	74	70		63	57	77	89	91		90	83	74	112	110	107	139	126	74	82	72
19-fev-22	114	73		108	104	94	87	117		97	109	93	113	98	105	111	104	90	102	113
20-fev-22	103	71		96	81	72	90	103		86	87	94	95	90	94	94	91	82	96	102
21-fev-22	126	86		121	102	96	113	136		129		151	130	107	117	122	119	97	146	148
22-fev-22	123	80	144	123	104	105	142	132		150	166	159	142	110	127	125	125	91	133	158
23-fev-22	91	64	109	76	74	81	99	99	54	104	110		91	80	85	96	99	60	102	102
24-fev-22	115	140	184	88	72	111	109	146	107	109	96		125	134	125	172	155	123	88	94
25-fev-22	140	102	158	105	86	101	103	137	124	102	106		122	120	120	140	142	114	98	107
26-fev-22	128	106		96	87	110	112	126	115	113	108	82	124	119	115	131	130		105	106
27-fev-22	128	78	148	110	96	100	99	136	119	107	112	83	124	100	125	104	107		111	121
28-fev-22	109	71	119	98	76	92	111	108	107	116		101	107	99	95	100	101		117	116
01-mar-22	101	66	114	76	68	71	91	95	97	92	87	71	86	87	80	96	92	73	92	86
02-mar-22	120	77		107	96	72	97	115		96		89	90	88	85	91	106	80	103	123
03-mar-22	119	83		98	90	79	95	106	117	95	105	95	94	86	90	100	107	84	112	121
04-mar-22	105	69	116	78	85	69	88	101	93	91	92	69	83	87	79	101	103	69	91	89
05-mar-22	132	75	129	116	98		95	114	120	103	117	99	111	92	98		110	89	119	130
06-mar-22		69	109	99	80	85	100	96	100	99	102	92	96	90	92		99	76	107	108
07-mar-22		72		108	85	89	113	119	123	130		142	111	98	105		119	81	142	146
08-mar-22	181	113		158	141	117	141	166	179	152	177	166	148	121	145	138	160	123	172	195
09-mar-22	148	76	125	110	116	86	99	121	134	106	117	87	104	92	104	106	118	89	117	122
10-mar-22	116	70	122	90	75	77	96	109	102	96	95	70	95	103	92	99	108	67	89	100

Figura 23 - Tabela do Relatório Anual da Cetesb para O₃ em fevereiro de 2022

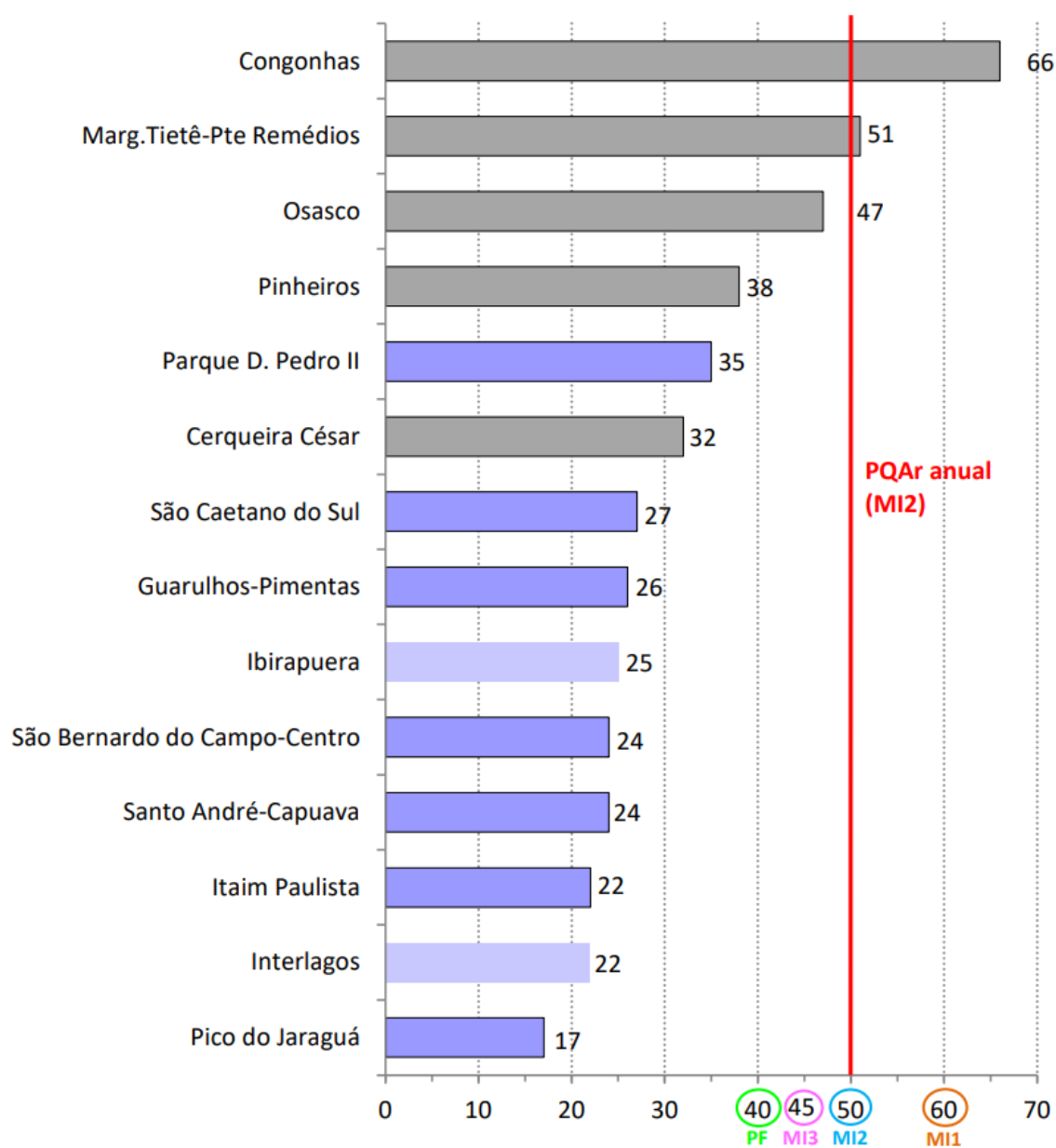


Figura 24 - Gráfico do Relatório Anual da Cetesb para média anual do NO₂ em 2022

6.2.4 Monóxido de Carbono – CO

Desde 2008, não tem ocorrido ultrapassagem do padrão de qualidade do ar de 8 horas para o monóxido de carbono (9 ppm) em nenhuma das estações da RMSP. Em 2022, a qualidade do ar foi classificada como BOA em todas as medições realizadas nas 15 estações que monitoraram esse poluente na RMSP. A maior concentração média de 8 horas observada foi 5,4 ppm, na estação São Caetano do Sul, seguida pelas estações Congonhas (4,9 ppm) e Taboão da Serra (4,3 ppm).

Figura 25 - Descrição da medição de média de CO no ano de 2022

5.2.1 Normalização dos dados

Como pode-se notar na tabela, os sistemas estão divididos em colunas com suas respectivas saídas geradas e normalizadas. Por exemplo, a saída do primeiro sistema é QS1 e a normalização se dá na saída QS1N. Esse processo foi usado para evitar anomalias nos dados inferidos. Mas, como pode-se notar, a diferença não é significativa e é possível concluir que os dados tiveram uma boa taxa de consistência. Ainda assim, será feita a comparação considerando prioritariamente os dados normalizados.

5.2.2 Índice de Qualidade do Sistema 1

As duas primeiras colunas de dados (QS1 e QS1N) são do sistema 1. Esses dados serão comparados com o MP_{10} , mas pode ser feita a mesma comparação com $MP_{2,5}$ que o resultado será similar.

Como é possível observar, os dados da Região 1, dos dias 3,4,5 e 8 da tabela que correspondem aos dias 23,24,25 e 28 de julho no relatório, registram um índice de qualidade do ar moderado. Já os do dia 2,6 e 7 se diferenciam dos do relatório (22, 26 e 27 de julho) por serem considerados como “moderado”. O resultado se mostrou semelhante também para as Regiões 2 e 3.

Ainda, é interessante observar o último dia de cada região, onde o programa, ao executar o cálculo seguindo a lógica fuzzy, classificou esses resultados como praticamente ideais, atingindo o valor de zero. Esse valor ocorreu devido à normalização, mas condiz bem com o cenário observado, uma vez que essas medidas foram extremamente baixas, chegando a ser menos da metade do valor máximo para a melhor classificação da Cetesb para ambos os materiais particulados.

Como explicado anteriormente, a classificação foi de autoria própria e seguiu um critério de simplificar a visualização dos dados, não interferindo no resultado de fato. Isso pode ser concluído porque, bem como no relatório oficial, os índices de qualidade que se diferenciaram têm um valor

menor do que os que foram compatíveis com a classificação de “moderado”, da mesma maneira que é registrada no relatório. Portanto os índices do sistema 1 estão de acordo com o relatório da Cetesb.

5.2.3 Índice de Qualidade do Sistema 2

Fazendo uma análise semelhante ao do Sistema 1, o índice do Sistema 2 levará em conta os dados do monóxido de Carbono (CO), uma vez que a outra entrada (QS1) já foi analisada e mostrou-se uma boa coerência dos dados.

Os valores de medição do monóxido de carbono são derivados de uma média anual no ano de 2022 para todas as regiões. O valor é de 5,4, valor considerado como índice “Boa” pela Cetesb. Os dados da coluna QS2N registraram da mesma maneira uma classificação “Bom” e “Muito bom”, com uma exceção da linha 18, que seria o dia 8 da Região 2, que beira levemente para o “Moderado”, mas ainda mantém um índice muito próximo do “Bom”.

5.2.4 Índice de Qualidade do Sistema 3

Para o Sistema 3 será melhor fazer a comparação dos dois gases, o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o ozônio (O₃). É importante ressaltar que o NO₂ teve um valor constante, pois trabalhou com médias anuais, enquanto o O₃ foi avaliado por dia e em regiões diferentes. Logo as medidas do ozônio poderão ter maior influência nos resultados.

O NO₂ teve um valor considerado “Bom” pela Cetesb para todas as regiões analisadas no relatório, que corresponde ao “Bom” das entradas elaboradas para o R. De acordo com as regras do Sistema 3 (Quadro 3, Seção 4.4), já é possível eliminar as chances da qualidade do ar do Sistema 3 (QS3) ter um valor “péssimo” ou “tóxico”. Os melhores índices do NO₂ foram observados na região 3.

Em relação ao gás O₃, observa-se que as regiões 1 e 3 tiveram os melhores resultados, com exceção do primeiro dia em São Caetano do Sul. No dia 1 da Região 1 foi possível notar uma maior concentração do gás, ocasionando em uma piora na qualidade do ar. Esse evento também ocorreu nos dias 8 e 9 da região 2 (Ibirapuera). Esses resultados do relatório da Cetesb foram equivalentes com as avaliações do R, que também classificou essas medições com um índice de valor mais alto, no caso como “Moderado”. Nos dias 2 a 5 da Região 3, foram observadas as medições com os valores mais baixos, assim como foi para o dióxido de nitrogênio. Dessa maneira, é de se esperar

que os melhores índices fossem nos dias 2 a 5 na Região 3, e a lógica fuzzy avaliou como esperado, tendo resultados classificados como “Muito bom”.

5.2.5 Índice de Qualidade do Ar Final (Sistema 4)

Finalmente, a partir da análise de todos os sistemas, foi feita a análise da QAF (considerando que QS4N é a saída definitiva), que considera todos os poluentes atmosféricos estudados neste sistema (MP_{10} , $MP_{2,5}$, CO, NO_2 e O_3).

Os melhores resultados podem ser observados nos últimos dias (Dia 10) de cada região. Esses dados são coerentes, pois as medidas do relatório da Cetesb apontam que esses foram os dias em que houve os menores registros de ambos os materiais particulados. E sabe-se que esse conjunto compõe o resultado do sistema 2, que leva em conta o monóxido de carbono, que também teve medidas muito baixas. Logo o índice de qualidade do ar do Sistema 2 normalizado (QS2N) também terá um valor muito baixo. E o peso do sistema 2 é maior do que o do Sistema 3, pois contém os gases mais tóxicos do sistema. Não obstante, as medidas do Sistema 3 também foram baixas, o que mostra que o resultado dos melhores índices de qualidade do ar é bem coerente.

As medidas com os piores índices de qualidade são observadas no Dia 8 das Regiões 1, 2 e 3. Esse resultado era esperado, já que são os dias com as piores medições da maioria dos gases, incluindo os materiais particulados, logo isso influenciou no valor alto do índice definitivo da qualidade do ar (QS4N) sendo também os três dias com as piores qualidades registradas. É importante notar que os dias 3, 4 e 5 da Região 3 mostraram um valor de “Moderado”, mesmo que o Sistema 3 tenha resultado em um “Muito bom”. Esse resultado também era esperado, pois o Sistema 1 registrou medidas mais altas e, como esse sistema tem maior peso, resultou em uma pior qualidade do ar para o Sistema 4.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente trabalho obteve uma grande quantidade de dados para serem analisados. Isso foi resultado de uma boa metodologia usada para preparar um sistema capaz de ler facilmente uma planilha com muitos dados e fazer uma inferência precisa para retornar os valores desejados para analisar os dados registrados, fornecendo uma QAF.

Ao final do estudo deste trabalho, esperava-se que fosse adquirido um maior conhecimento sobre Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF), um conteúdo não abordado nas disciplinas do curso. Além disso, havia a intenção de que este fosse integrado como uma ferramenta para o estudo dos problemas analíticos, especialmente na área de ciências ambientais. Não obstante, o trabalho conta com a possibilidade da reprodução do sistema, desenvolvido por CAGLAYAN (2017), para simplificar a análise de estudos estatísticos e comparativos. Os resultados deste trabalho tiveram base na proposta de usar o SBRF para uma análise gráfica de alguns gases tóxicos separados como sistemas, de modo que se pudesse apresentar o índice de qualidade do ar de maneira clara e simples.

Dentre os vários objetivos destacados nesse trabalho, os principais foram atingidos, que inclui o uso de um sistema que, apesar de uma programação um pouco complexa, é de fácil entendimento. Isso porque o R fornece ferramentas de análise úteis, como gráficos dos sistemas interativos, uma boa execução de análise de dados com as planilhas do excel salvas em um diretório, a visualização das planilhas analisadas dentro do programa e a possibilidade de modelar os dados de outras formas, como executar uma normalização.

Outros objetivos concluídos incluem o sucesso da lógica fuzzy na análise desses dados, onde os mesmos mostraram uma ótima coerência com o relatório da Cetesb e ainda fornecendo a capacidade de observar graficamente esses dados, como observado nas Figuras 10 a 21 da Seção 4.5 desse trabalho. O índice de qualidade do ar avaliado pela lógica fuzzy se mostrou bem preciso em suas classificações, o que mostra uma boa eficiência do programa e da metodologia aplicada. Foi possível, com sucesso, moldar um sistema que usasse as variáveis linguísticas como classificações numéricas e assim poder comunicar esses dados de maneira efetiva com o software R.

É interessante notar que todos esses passos puderam ser concluídos em um programa gratuito e de fácil acesso para todos, o que mostra que esse trabalho contribui muito para a criação de uma ferramenta para trabalhar com o cenário ambiental. Finalmente, esse foi um trabalho que houve um envolvimento do campo matemático, químico e das ciências ambientais. Tudo isso em conjunto mostra como que é a Engenharia Ambiental na prática e demonstra a sua capacidade de desenvolver ferramentas para lidar com as questões ambientais, como a análise de dados e até mesmo a avaliação da eficiência de políticas pública e ambientais em grandes municípios como o da Região Metropolitana de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANN L. POWER, RICHARD K. TENNANT, RICHARD T. JONES, YA TANG, JIE DU, ANNIE T. WORSLEY, JOHN LOVE. **Monitoring Impacts of Urbanisation and Industrialisation on Air Quality in the Anthropocene Using Urban Pond Sediments**. Front. Earth Sci., vol. 6 (2018), artigo 131.

CAGLAYAN, N; CELIK, H. K.; RENNIE, A.E.W. **Fuzzy Logic Based Ventilation for Controlling Harmful Gases in Livestock Houses**. In: 13TH INTERNATIONAL CONGRESS ON MECHANIZATION AND ENERGY IN AGRICULTURE & INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRECISION AGRICULTURE (2017), Izmir, Turkey.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Cetesb). **Boletim Diário**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/perguntas-frequentes/>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Cetesb). **O que é a Cetesb?**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/boletim-diario/>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Cetesb). **Padrões de Qualidade do Ar**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (Cetesb). **Publicações e Relatórios**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>. Acesso em 21 de agosto de 2023

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Padrões de Qualidade do Ar**. Resolução nº491, de 19 de novembro de 2018. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

GOUVEIA, N. et al. **Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo.** *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v.22, n.12, p.2669-77, 2006.

HEEDERIK, D.; SIGSGAARD, T.; THORNE, P.S.; et al. **Health effects of airborne exposures from concentrated animal feeding operations.** *Environmental Health Perspectives.* ,115 (2007), p. 298–302.

JAVID, A; HAMEDIAN, A.A; GHARIBI, H., SOWLAT, M.H. **Towards the Application of Fuzzy Logic for Developing a Novel Indoor Air Quality Index (FIAQI).** *Iranian Journal of Public Health.* v. 45, n 2 (2016) p. 203-13.

KARUN, V.; KUMAR, P. **Use of Fuzzy Set and Neural Network to Extract Fingerprint Minutiae Points and Location.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Software) - Thapar University, Computer Science and Engineering Department. Patiala, p. 7-27. 2009.

L. C. CHEN AND M. LIPPMANN. **Effects of Metals within Ambient Air Particulate Matter (PM) on Human Health.** *Inhalation Toxicology* vol.21 (2009), p. 1–31

LISBOA, E. G. et al. **Águas Subterrâneas**, v. 36, n. 1, e-30027, 2022

[MARRO, A.A.; SOUZA, A.M.C.; CAVALCANTE, E.R.S.; BEZERRA, G.S.; NUNES, R.O.](#)

Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações. Disponível em:

http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto_fuzzy.pdf.

Acesso em: 07 de janeiro de 2023.

MARTIN, K.L.; EMANUEL, R.E.; VOSE, J.M. Terra incógnita: The unknown risks to environmental quality posed by the spatial distribution and abundance of concentrated animal feeding operations. *Science of the total environmental*, v. 642 (2018), p. 887-893.

MARTINS, L. C. et al. Relação entre poluição atmosférica e atendimentos por infecção. *Revista Brasil Epidemiologia*. v. 4, n. 3, (2001), p. 220-229.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **QUALIDADE DO AR**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/perguntasfrequentes.html?catid=10#:~:text=Poluentes%20primários%20são%20os%20contaminantes,hidrocarbonetos%2C%20aldeídos%20e%20outros>). Acesso em: 16 de Outubro de 2023.

NASCIMENTO, Claudio Souza do. **Aplicação da metodologia fuzzy na quantificação da probabilidade de erro humano em instalações nucleares**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Reatores) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.85.2010.tde-01082011-160002. Acesso em: 2 de agosto de 2023

NGUYEN, ANH-TU., CAMPOS, V., PALHARES, R. et al. **Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future**. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. v.14, fevereiro de 2019, p.56-68. doi: 10.1109/MCI.2018.2881644. Acesso em 4 de julho de 2023.

OLIVEIRA, C.B.; BORTOLI, E.C.; BARCELLOS, J.O.J.; **Diferenciação por qualidade de carne bovina: a ótica do bem-estar animal**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.38, n. 7 (2008), p. 2092-2096.
Revista Brasileira de Epidemiologia, v.4, n.3, p.220-9, 2001.

S.N. DAPPER, C. SPOHR, R. R. ZANINI. **Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo**. Estudos Avançados, vol. 30 (2016), p. 86

SILVERT, W. **Fuzzy indices of environmental conditions**. Ecological Modelling, v. 130, n. 1-3 (2000), p. 111-119.

SOWLAT, M.H; GHARIBI, H; YUNESEIAN, M; MAHMOUDI, M.T. **A novel, fuzzy-based air quality index (FAQI) for air quality assessment**. Atmospheric Environment.v.45, n.12 (2011), p. 2050-2059.

VIEGAS, I.; VIEIRA, A.; STILWELL, G.; SANTOS, J. L.; FONTES, M. A. **Is there a link between beef quality and animal welfare in traditional beef systems?** New Medit, n. 3 (2011), p. 17-25.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Set Theory and Probability Theory: What is the Relationship?**. Springer eBooks, p. 563–566, 1 jan. 2011

ZADEH, L.A. **Fuzzy Sets**. Information and Control, v.8 (1965), p. 338-353.

ANEXO A – Resolução CONAMA N° 491/2019¹

Padrões de Qualidade do Ar

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m³	µ/m³	µg/m³	µg/m³	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO2	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O3	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb5	Anual ¹	-	-	-	0,5	-
1 - média aritmética anual						
2 - média horária						
3 - máxima média móvel obtida no dia						
4 - média geométrica anual						
5 - medido nas partículas totais em suspensão						

¹ BRASIL. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 155, n. 223, p. 155-156, 21 nov. 2018.

Níveis de Atenção, Alerta e Emergência para os Poluentes e suas Concentrações

Nível	Poluentes e concentrações					
	SO ₂ µg/m ³ (média de 24h)	Material Particulado	CO Ppm (média móvel de 8h)	O ₃ µg/m ³ (média móvel de 8h)	NO ₂ µg/m ³ (média de 1h)	
		MP10	MP2,5			
		µg/m ³ (média de 24h)	µg/m ³ (média de 24h)			
Atenção	800	250	125	15	200	1.130
Alerta	1.600	420	210	30	400	2.260
Emergência	2.100	500	250	40	600	3.000

SO₂= dióxido de enxofre; MP10 = material particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 µm;

MP2,5= material particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 µm; CO = monóxido de carbono;

O₃= ozônio; NO₂= dióxido de nitrogênio µg/m³; ppm = partes por milhão.

Cálculo do Índice de Qualidade do Ar

Qualidade	Índice	MP10	MP2,5	O3	CO	NO2	SO2
		(µg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)	(ppm)	(µg/m³)	(µg/m³)
		24h	24h	8h	8h	1h	24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20

Equação 1 - Cálculo do Índice de Qualidade do Ar

Equação 1 - Cálculo do Índice de Qualidade do Ar

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini})$$

Onde:

I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa.

I_{fin} = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa.

C_{ini} = concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.

C_{fin} = concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

C = concentração medida do poluente.

Onde:

I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa.

I_{fin} = valor do índice que corresponde à concentração final da faixa.

C_{ini} = concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.

C_{fin} = concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

C = concentração medida do poluente.

ANEXO B – Tabelas de Parâmetros da Cetesb²

Critérios do Decreto Estadual nº 59113/2013 para os Padrões de Qualidade do Ar

Critérios para episódios agudos de poluição do ar
(Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013)

Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
partículas inaláveis finas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	125	210	250
partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	250	420	500
dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	800	1.600	2.100
dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1h	1.130	2.260	3.000
monóxido de carbono (ppm) – 8h	15	30	40
ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 8h	200	400	600

² CETESB. **Padrões de Qualidade do Ar**. São Paulo: CETESB, [2023]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acesso em 15 out. 2023.

Parâmetros do Índice de Qualidade do Ar da Cetesb

Estrutura do índice de qualidade do ar

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³) 24h	MP _{2,5} (µg/m ³) 24h	O ₃ (µg/m ³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m ³) 1h	SO ₂ (µg/m ³) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
N4 – Muito Ruim	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130	>365 – 800
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Tabela de relação da qualidade do ar e os efeitos na saúde – Cetesb

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m³) 24h	MP _{2.5} (µg/m³) 24h	O ₃ (µg/m³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m³) 1h	SO ₂ (µg/m³) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 – Moderada	41 - 80	>50 - 100 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>25 - 50 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>100 - 130 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>9 - 11 Pessoas com doenças cardíacas podem apresentar sintomas como cansaço e dor no peito.	>200 - 240 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.	>20 - 40 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
N3 – Ruim	81 - 120	>100 - 150 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.	>50 - 75 Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.	>130 - 160 Pessoas com doenças respiratórias, como asma, e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.	>11 - 13 População em geral pode apresentar sintomas como cansaço. Pessoas com doenças cardíacas têm os sintomas como cansaço e dor no peito agravados.	>240 - 320 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias e crianças têm os sintomas agravados.	>40 - 365 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados.
N4 – Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.	>75 - 125 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.	>160 - 200 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.	>13 - 15 Aumento de sintomas em pessoas cardíacas. Aumento de sintomas cardiovasculares na população em geral.	>320 - 1130 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.	>365 - 800 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
N5 – Péssima	> 200	>250 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.	>125 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.	>200 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica.	>15 Agravamento das doenças cardiovasculares, como infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca congestiva.	>1130 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica.	>800 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.

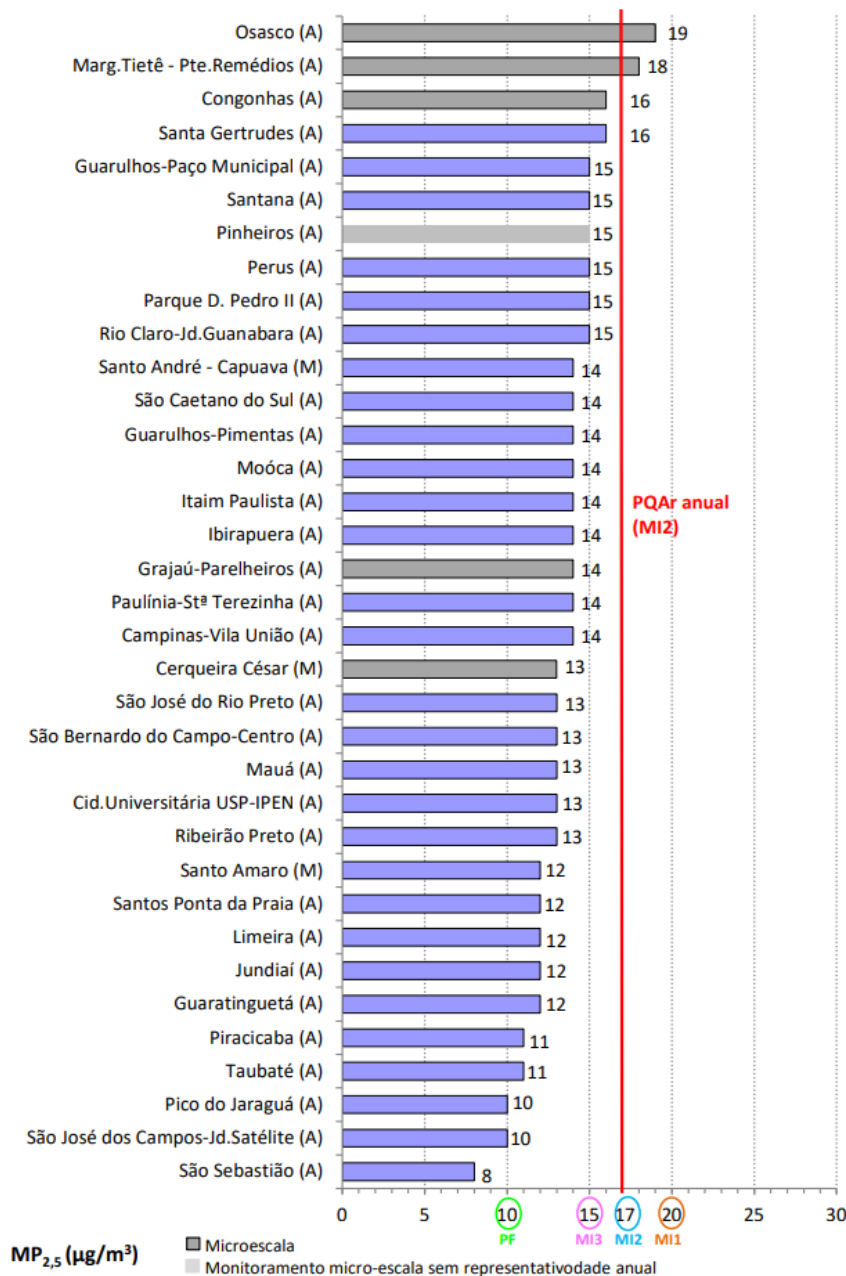
Tabela de relação da qualidade do ar e a prevenção de riscos à saúde – Cetesb

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m³) 24h	MP _{2.5} (µg/m³) 24h	O ₃ (µg/m³) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ (µg/m³) 1h	SO ₂ (µg/m³) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	41 - 80	>50 - 100 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.	>25 - 50 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.	>100 - 130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.	>9 - 11 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem reduzir esforço físico pesado ao ar livre e evitar vias de tráfego intenso.	>200 - 240 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.	>20 - 40 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, procurem reduzir esforço pesado ao ar livre.
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças. >150 - 250 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>50 - 75 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças. >75 - 125 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>130 - 160 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças. >160 - 200 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>11 - 13 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem reduzir esforço físico pesado ao ar livre e evitar vias de tráfego intenso. >13 - 15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar esforço físico e vias de tráfego intenso.	>240 - 320 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças. >320 - 1130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>40 - 365 Reduzir o esforço físico pesado ao ar livre, principalmente pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças. >365 - 800 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>75 - 125 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>160 - 200 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>13 - 15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar esforço físico e vias de tráfego intenso.	>320 - 1130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.	>365 - 800 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar esforço físico pesado ao ar livre; o restante da população deve reduzir o esforço físico pesado ao ar livre.
N5 - Péssima	> 200	>250 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.	>125 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.	>200 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.	>15 Pessoas com doenças cardíacas, como angina, devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre e vias de tráfego intenso.	>1130 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.	>800 Pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, idosos e crianças devem evitar qualquer esforço físico ao ar livre; o restante da população deve evitar o esforço físico pesado ao ar livre.

ANEXO C – Tabelas da Cetesb, na RMSP, com os dados completos de todos os gases estudados no trabalho³

Dados do Relatório Anual da Cetesb 2022 – MP_{2,5}

Gráfico 6.14 – MP_{2,5} – Concentrações médias anuais – RMSP, Baixada Santista e Interior – 2022



Fonte: CETESB (2023)

Nota:

MI1; MI2 = PQAr e MI3 = Metas Intermediárias; PF = Padrão Final, estabelecidos no Decreto Estadual nº 59.113/2013.

³ CETESB. **Qualidade do Ar: Publicações e Relatórios**. São Paulo: CETESB, [2023]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 21 ago. 2023.

Tabela 6.8 – $MP_{2,5}$ – Concentração média diária ($\mu g/m^3$) e classificação da qualidade do ar – RMSP, Interior e Baixada Santista

	RMSP																				INTERIOR e LITORAL																	
Data	Cerqueira César (M)	Cid. Universitária-USP-Ipen	Congonhas	Grajau-Parelheiros	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Ibirapuera	Itaim Paulista	Marg. Tietê-Ponte dos Remédios	Mauá	Mooca	Osasco	Parque D. Pedro II	Perus	Pico do Jaraguá	Pinheiros	S. Bernardo-Centro	Santana	Santo Amaro (M)	Santo André - Capuava (M)	São Caetano do Sul	Campinas-V. União	Guaratinguetá	Jundiaí	Limeira	Paulínia-S. Terezinha	Piracicaba	Ribeirão Preto	Rio Claro-Jd. Guanabara	S. José Campos-Jd. Satélite	Santa Gertrudes	Santos-Ponta da Praia	São José do Rio Preto	São Sebastião	Taubaté			
24-jun-22		42	53	47	41	53	43		46	32	41	46	40		15	45	46	33				34	17	26	19	22	22	21	35	22	31	18	23	15	22			
25-jun-22		29	34	21	33	45	31		35	22	30	32	32		12		30	27			37	32	17	23	23	19	20	29	17	31	14	23	11	14				
26-jun-22		4	7	5	5	6	5		6		5	5	6		5		8	7			5	7	8	6	8	6	6	10	9	6	11	4	11	2	5			
27-jun-22		10	12	10	12	11	11		15		10	17	13		9	13	7	12			11	12	11	8	12	8	12	15	15	7	18	8	18		8			
28-jun-22	23	19	23	28	24	24	21		30		22	30	26		12	25	19	21	19	25	21	21	14	20	19	18	19	23	29	17	26	12	24	6	15			
29-jun-22		23	28	24	22	25	22		33	23	23	33	28		16	24	24	23			26	18	17	26	23	22	20	26	30	17	25	15	22	12	22			
30-jun-22		18	23	17	34	30	21		29	24	23	26	26		16	24	21	28			27	25	24	23	14	25	17	23	28	16	22	13	16	6	30			
01-jul-22		35	38	31	38	33	39		50	27	35	52	40		19	40	35	42			36	33	22	27	23	26	21	24	39	22	28	16	29	10	24			
02-jul-22		26	24	34	23	26	25		39	19	26	45	28		17	28	25	28			23	26	22	22	23	24	20	21	28	21	28	30	29	16	24			
03-jul-22		26	23	29	32	27	25	30	39	26	24	53	27		16	27	22	29			23	27	20	20	22	25	19	17	29	20	24	32	20	14	22			
04-jul-22	25	30	27	34	30	31	27	39	50	26	28	46	33		14	36	25	27	33	26	26	23	19	23	20	23	18	22	29	24	29	25	20	17	20			
05-jul-22		27	34	31	24	36	25	49	39	34	27	38	28	18	12	29	31	23			29	29	16	23	13	29	18	18	29	24	24	24	17	12	17			
06-jul-22		29	37	39	33	45	30	50	41	27	32	41	31	24	10	38	34	26			37	24	18	20	20	25	17	16	41	24	25	29	17	10	18			
07-jul-22		24	28	29	23	24	21	29	35	18	22	41	22	23	11	26	21	16			28	21	18	16	14	17	13	17	31	18		22	21	9	17			
08-jul-22		38	33	32	28	33	27	37	44	20	30	39	33	25	16	36	26	30			26	25	21	23	23	19	18	21	35	16		19	20	13	18			
09-jul-22		20	22	18	29	28	23	25	27	15	22	25	24	24	22	21	19	27			20		25	21	20	18	18	17	31	20		10	19	12	17			
10-jul-22	15	15	22	28	21	27	24	45	26	30	21	29	20	19	10	16	24	19	20	29	32		16	17	13	12	15	15	21	16		19	14	11	19			
11-jul-22		12	11	26	15	17	18	24	21	19	14	16	16	11	7	13	17	13			17		11	10	11	12	11	18	16	13		16	14	8	13			
12-jul-22		10	11	12	11	13	10	11	17		9	19	11	9	10	12	9	9			9	20	9	15	10	14	15	20	17	13		16	14	9	10			
		Boa										Moderada					Ruim																					

Boa

Moderada

Ruim

Fonte: CETESB (2023)

Tabela 6.11 – $MP_{2,5}$ – Concentração média diária ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e classificação da qualidade do ar – RMSP, Interior e Baixada Santista

	RMSP																				INTERIOR e LITORAL														
Data	Cerqueira César (M)	Cid. Universitária-USP-Ipen	Congonhas	Grajaú-Parelheiros	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Ibirapuera	Itaim Paulista	Marg. Tietê-Ponte dos Remédios	Mauá	Mooca	Osasco	Parque D. Pedro II	Perus	Pico do Jaraguá	Pinheiros	S. Bernardo-Centro	Santana	Santo Amaro (M)	Santo André - Capuava (M)	São Caetano do Sul	Campinas-V. União	Guaratinguetá	Jundiaí	Limeira	Paulínia-S.ª Terezinha	Piracicaba	Ribeirão Preto	Rio Claro-Jd. Guanabara	S. José Campos-Jd. Satélite	Santa Gertrudes	Santos-Ponta da Praia	São José do Rio Preto	São Sebastião	Taubaté
21-jul-22		16	20	18	19	19	18	19	24	16	15	22	17	18	13	19	17	18			19		16	13	23	15	17			11	28	12	22	5	12
22-jul-22		33	28	32	36	43	28	38	49		31	46	36	23	15	36	21	34	31	29	24		18	25	20	21	23			20	34	19	21	8	17
23-jul-22		40	38	41	38	54	33	41	45		39	42	39	27	20	40	28	35			32		18	27	23	27	24			25	41	25	23	10	19
24-jul-22		41	34	38	47	46	33	49	51		36	49	40	38	28	43	29	51			38		21	34	23	28	27			26	35	25	21	19	22
25-jul-22		36	31	34	32	37	33	34	45		32	42	37	32	22	39	28	41			30		21	29	23	26	23			20	36	26	23	16	18
26-jul-22		35	33	23	40	37	32	36	43	31	32	45	35	35	27	38	25	40			28		18	34	29	29	32			20	43	20	28	15	19
27-jul-22		29	32	31	33	33	32	31	31	29	26	34	28	31	23	31	28	31			29		22	26	36	27	28			23		14	32		23
28-jul-22	31	33	34	34	33	36	32	39	44	30	31	44	33	28	19	35	25	33	27	23	29		17	33	29	32	29		36	20		26	26		18
29-jul-22		14	20	14	13	17	15	21	23	19	15	24	14	14	15	13	14	18			15	20	15	25	19	20	19		27	17		12	21	13	17
30-jul-22		8	12	6	16	15	10	12	13	9	11	12	13	11	10	10	7	15			12	14	14	14	13	12	11	16	14	9		10	16	8	9
31-jul-22		14	15	12	18	16	15	15	17	11	13	19	14	18	13	16	12	15			12	19	13	16	20	15	17	28	25	11		7	21	8	13
01-ago-22		22	24	24	25		22	28	28	27	22	28	24	26	15	27	21	22			21	26	18	22	22	31	19	40	37	18		13	27	13	16
02-ago-22		31	38	32	33	26	33	39	43	42	37	40	39	31	16	41	30	33			39	38	19	25	29	25	22	44	39	22		19	48	15	17
03-ago-22	30	31	32	20	40	33	31	32	37	26	28	38	34	32	26	31	25	39	23	29	32	34	20	29	29	26	27	31	53	18		22	34	12	18
04-ago-22		33	30	39	25	26	29	31	44	34	28	43	29	29	19	34	27	29			27	31	25	27	29	27	31	33	44	25		22	29	16	24
05-ago-22		19	24	18	33	28	19	25	27	24	20	33	23	20	16	24	20	24			24	26	20	33	29	29	26	39	29	21	36	18	28	19	17
06-ago-22		9	12	8	10	9	8	9	11	7	9	15	12	14	11	11	7	14			8	15		14	18	13	16		20	5	28	9	33	8	9
07-ago-22		11	12	12	12	10	12	11	11	13	10	12	11	11	8	14	11	13			12	13	15	12	18	20	11	43	25	9	22	9	26	8	15

Boa

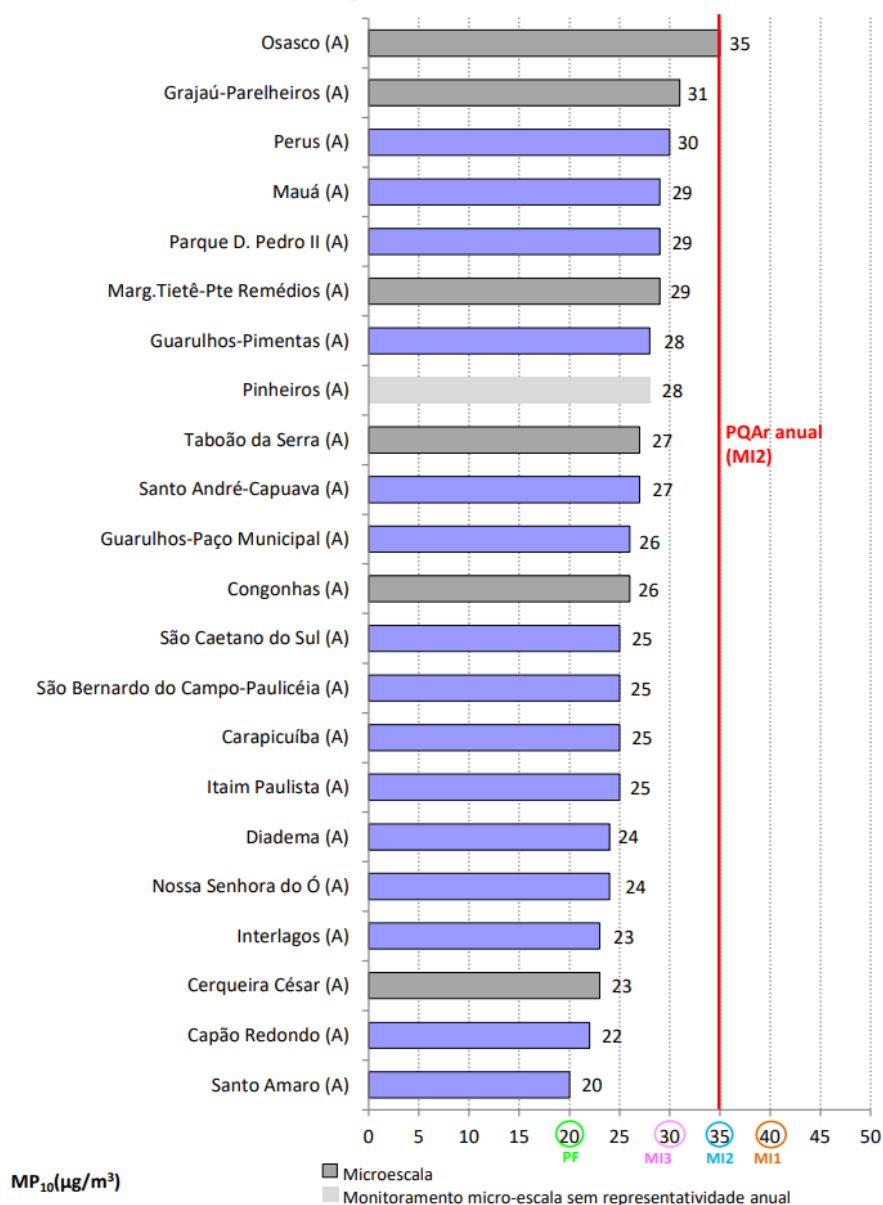
Moderada

Ruim

Fonte: CETESB (2023)

Dados do Relatório Anual da Cetesb 2022 – MP₁₀

Gráfico 6.2 – MP₁₀ – Concentrações médias anuais RMSP – 2022



	RMSP																									
Data	Capão Redondo	Carapicuíba	Cerqueira César	Congonhas	Diadema	Grajaú-Paraisópolis	Guarulhos-Pago Municipal	Guarulhos-Pimentas	Interlagos	Itaim Paulista	Marg. Tietê- Ponte dos Remédios	Mauá	Nossa Senhora do Ó	Osasco	Parque D.Pedro II	Penus	Pinhheiros	S.André-Capuaçu	S.Bernardo-Paulicéia	Santo Amaro	São Caetano do Sul	São Sebastião	Taubaté da Serra			
24-jun-22	57	57	63	81	60	99	74	99	80	76	76	96	59	78	86	57	61	76	85	55		40				
25-jun-22	35	33	39	39	40	45	47	77	42	75	51	57	40	49	59	33	42	68	49	33	55	20	44			
26-jun-22	6	9	6	10	12	10	8	10	7	7	7	13	8	13	9	10	10	9	7	5	8	8	8			
27-jun-22	16	21	20	19	14	21	24	22	18	16	27	16	21	33	24	33	22	16	19	14	17	9	20			
28-jun-22	36	43	43	43	37	70	44	45	42	36	54	52	40	58	56	54	44	45	39	35	39	32	49			
29-jun-22	46	51	45	54	44	69	49	61	48	51	69	67	49	71	65	55	54	56	57	38	51	47	60			
30-jun-22	29	39	40	36	33	37	55	55	27	44	55	44	44	47	49	52	37	48	37	31	41	38	40			
01-jul-22	45	61	62	54	47	57	57	51	50	45	81	61	52	74	73	66	60	56	53	41	55	23	53			
02-jul-22	57	60	45	43	41	84	47	50	50	41	65	51	49	77	57	61	47	48	41	42	44	33	58			
03-jul-22	66	66	42	37	37	72	55	50		47	61	50	47	72	51	57	42	44	42	39	41	29	61			
04-jul-22	57	56	48	48	50	85	57	59	43	62	91	69	50	75	72	45	61	54	57	46	52	34	70			
05-jul-22	52	63	47	56	50	87	55	73		76	72	79	54	77	67	51	57	68	61	46	60	30	62			
06-jul-22	55		55	67	52	106	65	85		77		84	57	79	71	60	65	82	76	47	67	27	66			
07-jul-22	51		41	53	48	89	53	60	53	53	64	70	47	84	55	56	53	57	61	44	57	26	67			
08-jul-22	42		50	59	44	80	54	64	52	55	77	54	44	72	66	57	63	54	49	49	47	59	63			
09-jul-22	33		36	34	33	40	46	49	35	34	44	34	40	41	43	47	34	39	35	28	35	28	32			
10-jul-22	39		27	31	32	64	36	41	40	55	38	48	28	50	34	38	29	44	36	30	43	23	35			
11-jul-22	39		30	31	34	73	35	39	40	39	40	47	27	55	40	31	33	42	38	33	41	23	33			
12-jul-22	35		32	33	29	51	39	44	35	33	44		36	60	43	33	35	37	32	28	31	55	30			
						Boa			Moderada			Ruim														

Tabela 6.9 – MP₁₀ – Concentração média diária (µg/m³) e classificação da qualidade do ar – RMSP

Data	RMSP																						
	Capão Redondo	Carapicuíba	Cerqueira César	Congonhas	Diadema	Grajaú-Paraisópolis	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Interlagos	Itaim Paulista	Marg. Tietê-Ponte dos Remédios	Mauá	Nossa Senhora do Ó	Osasco	Parque D. Pedro II	Perus	Pinheiros	S. André-Capuaçu	S. Bernardo-Paraisópolis	Santo Amaro	São Caetano do Sul	São Sebastião	Taboão da Serra
21-jul-22	34	39	30	31	28	42	39	39	33	30	40	48	30	47	26	46	37	39	36	26	33	13	29
22-jul-22	52	58	48	44	38	71	68	82	48	56	73		45	77	81	60	55	50	45	48	46	20	66
23-jul-22	51	54	56	64	45	84	66	93	68	63	68		51	65		58	58	69	57	52	53	20	57
24-jul-22	56	62	45	48	41	75	76	74	67	67	67		53	63	79	67	55	51	59	44	57	32	53
25-jul-22	54	62	50	53	44	75	58	67	60	50	68		54	68	72	63	54	59	54	50	52	33	55
26-jul-22	39	65	48	61	39	47	71	67	40	59	72	54	57	71	62	80	51	49	48	36	47	38	44
27-jul-22	49	62	49	54	39	61	60	62	45	47	53	37	47	62	52	71	48	53	53	38	47	38	39
28-jul-22	70	81	65	67	55	85	74	81	64	73	80	54	64	81		71	67	60	62	54	61	37	79
29-jul-22	30	44	35	39	30	41	40	46	35	39	45	34	38	52	36	46	36	39	31	29	36	33	45
30-jul-22	14	20	12	21	16	17	26	29	15	18	21	19	23	27	26	27	22	24	19	13	20	22	18
31-jul-22	24	28	24	23	20	25	35	30	24	22	27	18	23	29	23	30	24	24	26	18	22	17	22
01-ago-22	37	42	37	37		50	39	47	39	39	45	37	34	45	52	47	37	53	35	31	32	26	34
02-ago-22	49	54	53	58		64	55	67	56	55	64	79	66	68	82	70	57	64	57	44	57	33	52
03-ago-22	45	57	49	48		48	67	66	35	48	60	46	52	59	68	73	51	53	44	30	49	24	44
04-ago-22		73	58	56		108	49	60	56	56	74	53	54	81	67	70	69	59	55	52	51	29	59
05-ago-22	45	51	42	47		52	65	62	41	45	59	49	48	67	67	56	46	52	49	34	49	86	46
06-ago-22	13	25	17	19		23	21	21	14	22	18	10	21		24	33	20	15	16	12	17	19	18
07-ago-22		25	19	18		24	18	21	17	17	18	19	18		30	20	20	15	20	12	18	18	16

Boa

Moderada

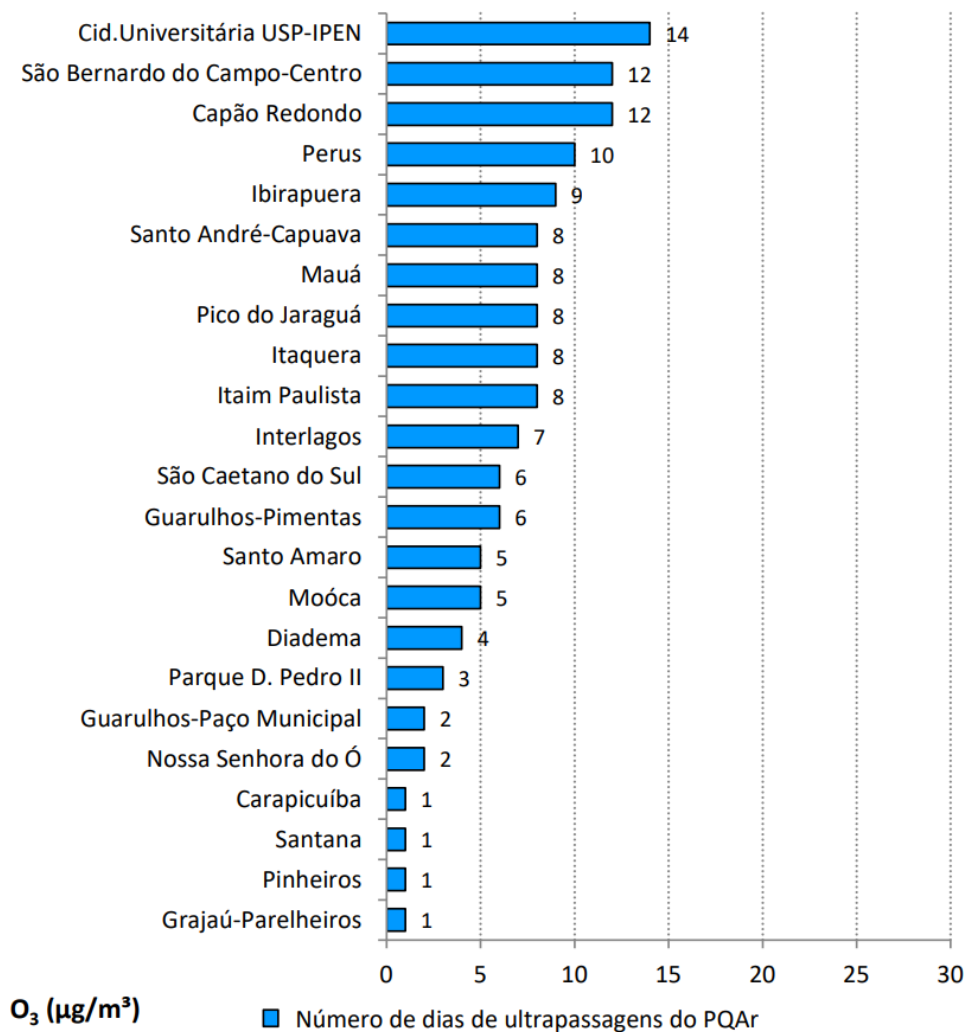
Ruim

Fonte: CETESB (2023)

Dados do Relatório Anual da Cetesb 2022 – O₃

No **Gráfico 6.21**, é apresentada a classificação do número de dias em que o PQAr estadual (130 µg/m³ – 8h) foi ultrapassado nas estações da RMSP, em 2022.

Gráfico 6.21 – O₃ – Classificação do número de dias com ultrapassagens do padrão de 8h – RMSP – 2022



Fonte: CETESB (2023)

Tabela 6.16 – O₃ – Concentrações máximas diárias – médias de 8 horas (µg/m³) e classificação da qualidade do ar – RMSP

Data	RMSP																			
	Capão Redondo	Carapicuíba	Cid. Universitária-USP-Ipen	Diadema	Grajaú-Parque	Guarulhos-Paço Municipal	Guarulhos-Pimentas	Ibirapuera	Interlagos	Itaim Paulista	Itaquera	Mauá	Mooca	Nossa Senhora do Ó	Parque D. Pedro II	Perus	Pico do Jaraguá	Pinheiros	S. André-Capuaçu	S. Bernardo-Centro
14-fev-22	118	77	144	110	84	125	144	134		159		155	143	108	125	111	111	102	152	132
15-fev-22	72	75		62	55	84	97	92	41	91	82	72	104	90	96	131	128	77	81	72
16-fev-22	92	99	105	64	57	79	80	109	43	80	76	64	105	100	98	141	128	95	73	67
17-fev-22	87	56		63	60	61	75	79	41	82	81	74	75	68	67	78	77	48	73	74
18-fev-22	74	70		63	57	77	89	91		90	83	74	112	110	107	139	126	74	82	72
19-fev-22	114	73		108	104	94	87	117		97	109	93	113	98	105	111	104	90	102	113
20-fev-22	103	71		96	81	72	90	103		86	87	94	95	90	94	94	91	82	96	102
21-fev-22	126	86		121	102	96	113	136		129		151	130	107	117	122	119	97	146	148
22-fev-22	123	80	144	123	104	105	142	132		150	166	159	142	110	127	125	125	91	133	158
23-fev-22	91	64	109	76	74	81	99	99	54	104	110		91	80	85	96	99	60	102	102
24-fev-22	115	140	184	88	72	111	109	146	107	109	96		125	134	125	172	155	123	88	94
25-fev-22	140	102	158	105	86	101	103	137	124	102	106		122	120	120	140	142	114	98	107
26-fev-22	128	106		96	87	110	112	126	115	113	108	82	124	119	115	131	130		105	106
27-fev-22	128	78	148	110	96	100	99	136	119	107	112	83	124	100	125	104	107		111	121
28-fev-22	109	71	119	98	76	92	111	108	107	116		101	107	99	95	100	101		117	116
01-mar-22	101	66	114	76	68	71	91	95	97	92	87	71	86	87	80	96	92	73	92	86
02-mar-22	120	77		107	96	72	97	115		96		89	90	88	85	91	106	80	103	123
03-mar-22	119	83		98	90	79	95	106	117	95	105	95	94	86	90	100	107	84	112	121
04-mar-22	105	69	116	78	85	69	88	101	93	91	92	69	83	87	79	101	103	69	91	89
05-mar-22	132	75	129	116	98		95	114	120	103	117	99	111	92	98		110	89	119	130
06-mar-22		69	109	99	80	85	100	96	100	99	102	92	96	90	92		99	76	107	108
07-mar-22		72		108	85	89	113	119	123	130		142	111	98	105		119	81	142	146
08-mar-22	181	113		158	141	117	141	166	179	152	177	166	148	121	145	138	160	123	172	195
09-mar-22	148	76	125	110	116	86	99	121	134	106	117	87	104	92	104	106	118	89	117	122
10-mar-22	116	70	122	90	75	77	96	109	102	96	95	70	95	103	92	99	108	67	89	100

Boa

Moderada

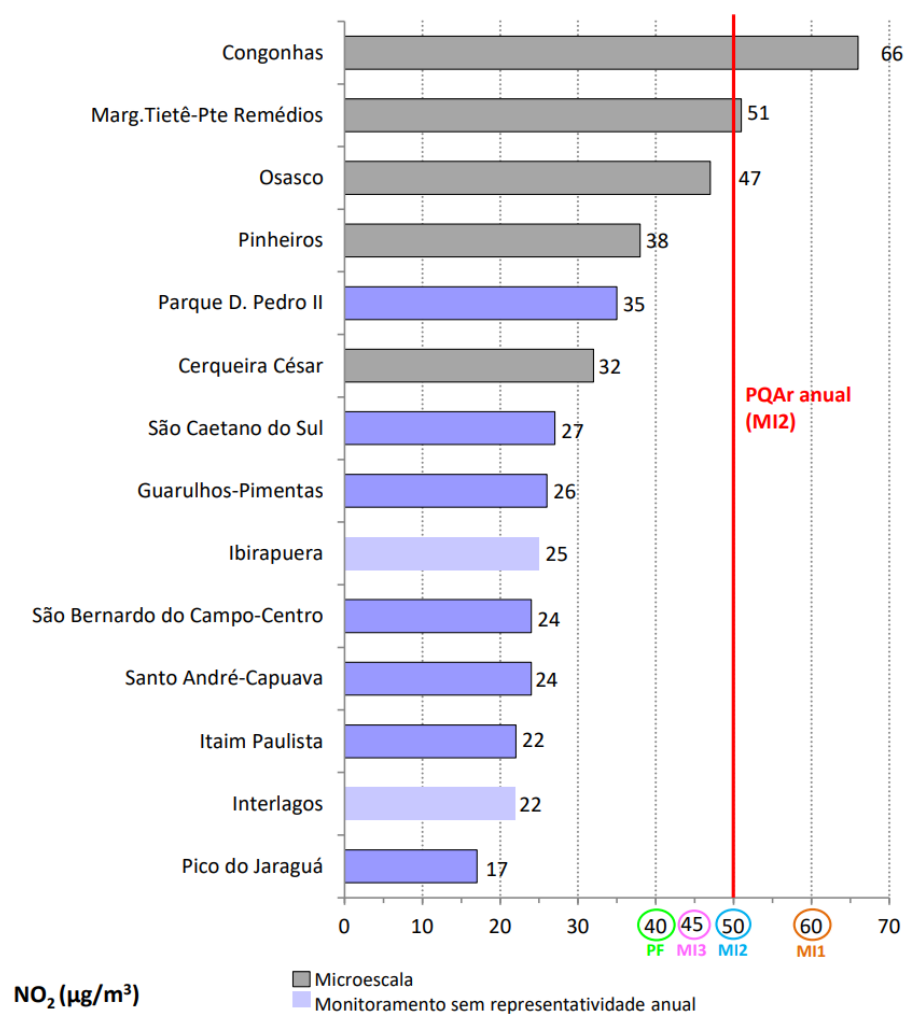
Ruim

Muito Ruim

Fonte: CETESB (2023)

Dados do Relatório Anual da Cetesb 2022 – NO₂

Gráfico 6.24 – NO₂ – Concentrações Médias Anuais – RMSP – 2022



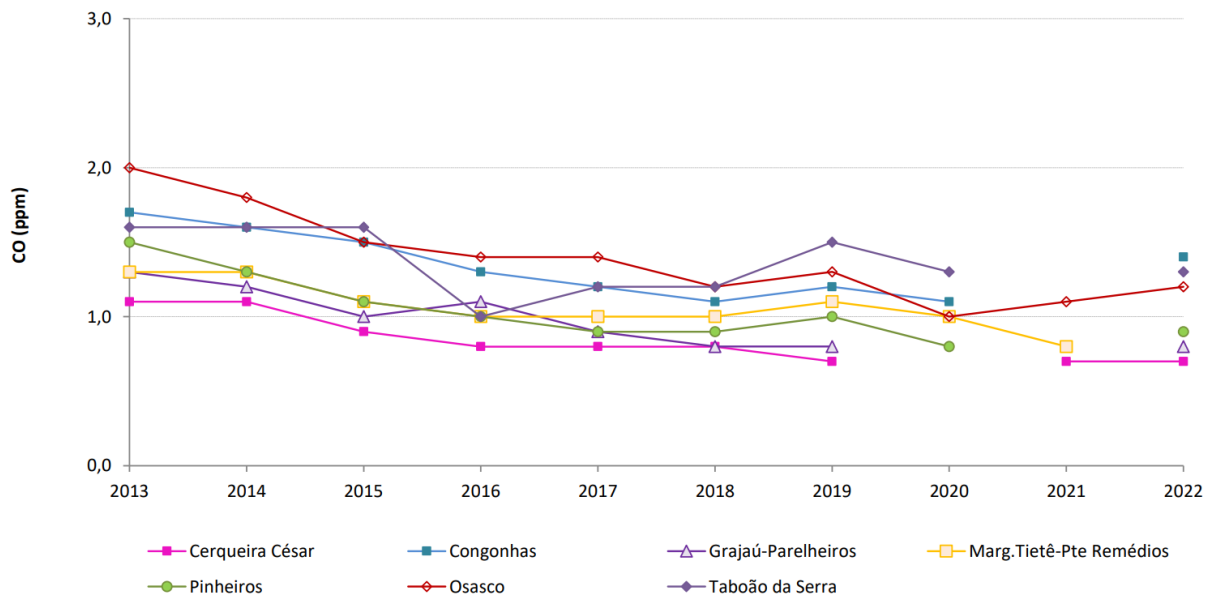
Fonte: CETESB (2023)

Nota:

MI1; MI2 = PQAr e MI3 = Metas Intermediárias; PF = Padrão Final, estabelecidos no Decreto Estadual nº 59.113/2013.

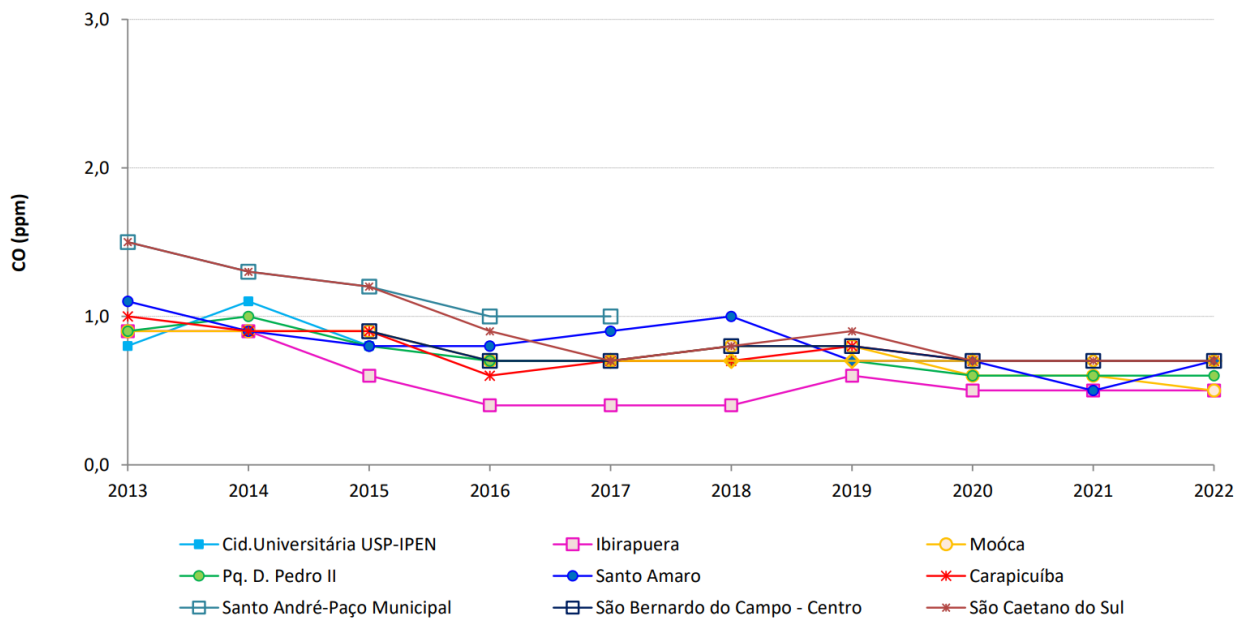
Dados do das médias anuais de CO do Relatório Anual da Cetesb 2022

Gráfico 6.27 – CO – Evolução das médias anuais das concentrações máximas diárias (médias de 8 horas) RMSP - Microescala



Fonte: CETESB (2023)

Gráfico 6.28 – CO – Evolução das médias anuais das concentrações máximas diárias (médias de 8 horas) RMSP – Demais escalas



Fonte: CETESB (2023)