



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A VISIBILIDADE E AS
CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO NA
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Lucas Lemos da Cunha Palma

**Itajubá, MG, Brasil
2025**

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A VISIBILIDADE E AS CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

por

Lucas Lemos da Cunha Palma

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa
de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade
Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para
obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Vanessa Silveira Barreto Carvalho

**Itajubá, MG, Brasil
2025**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

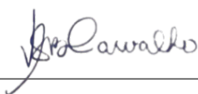
**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A VISIBILIDADE E AS
CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

elaborada por

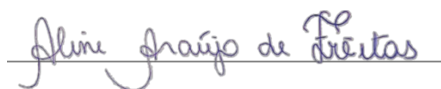
Lucas Lemos da Cunha Palma

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Vanessa Silveira Barreto Carvalho (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Aline Araújo de Freitas (UNIFEI)



Paola do Nascimento Silva (UNIFEI)

Itajubá, 25 de novembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela graça concedida nesta jornada de graduação, por toda a força, sabedoria e perseverança necessárias para enfrentar os desafios até aqui. Agradeço à minha esposa, Bruna, por sempre confiar em mim e por todo o suporte ao longo desses anos, incentivando-me continuamente a seguir em frente e a me superar diariamente. Sou igualmente grato aos meus pais, Dirceu e Manuela, ao meu irmão, Luan, e a todos os meus familiares que acreditaram em mim e não me deixaram desistir. Expresso também minha profunda gratidão à professora Vanessa Silveira Barreto Carvalho pela orientação e pelos ensinamentos em diversos trabalhos, inclusive neste, ao longo de todos os anos de graduação. Por fim, agradeço aos meus amigos de faculdade, que tornaram essa jornada mais leve e me proporcionaram momentos inesquecíveis.

Dedico
a todos que veem na Meteorologia
a arte de entender o mundo.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A VISIBILIDADE E AS CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

AUTOR(A): LUCAS LEMOS DA CUNHA PALMA
ORIENTADOR: VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO
Local e Data da Defesa: Itajubá, 25 de novembro de 2025.

O presente estudo avaliou a relação entre a visibilidade horizontal e as concentrações de material particulado (PM₁₀) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O objetivo foi analisar a correlação entre poluição e redução da visibilidade nos aeroportos, identificar os poluentes que mais a prejudicam, e comparar dados de estações de monitoramento de qualidade do ar com os de visibilidade para entender a relação entre a concentração de poluentes e a perda de visibilidade. Para a metodologia, dados de visibilidade (METAR) dos aeroportos Galeão (SBGL), Santos Dumont (SBRJ) e Base Aérea de Santa Cruz (SBSC), dados de PM₁₀ das estações E17, E21 e E23 (SIGQA - INEA-RJ), e dados de umidade relativa (ERA5) foram harmonizados em médias diárias para o período de 2004 a 2023. A análise envolveu a construção de gráficos da ocorrência de dias com visibilidade ≤ 1 km e da tendência média anual de PM₁₀, além da aplicação de regressão linear simples. A regressão foi ajustada separadamente para três faixas de umidade relativa (abaixo de 60%, entre 60% e 80%, e igual ou superior a 80%). Os resultados mostraram uma clara tendência de diminuição em dias com baixa visibilidade (≤ 1 km). Há também uma tendência de queda na concentração anual de PM₁₀ nas três estações analisadas, reforçando a relação entre a melhoria da qualidade do ar e a diminuição dos dias com baixa visibilidade. A análise de regressão indicou que a relação entre PM₁₀ e visibilidade é modulada pela umidade relativa. Nas condições de umidade mais baixa (<60%), a inclinação negativa da regressão foi mais acentuada, indicando uma forte redução da visibilidade com o aumento do PM₁₀, devido à dispersão da luz pelos aerossóis. Em umidade superior a 80%, outros fenômenos meteorológicos, como névoa/neblina, tendem a dominar a visibilidade, e a correlação com o PM₁₀ se torna mais fraca ou positiva, especialmente na Base Aérea de Santa Cruz. O estudo confirma a forte correlação entre a redução do PM₁₀ e a melhoria da visibilidade na RMRJ, sugerindo um impacto positivo das medidas de controle de poluição, mas ressalta que eventos climáticos extremos, como a seca, podem intensificar a concentração de poluentes e reduzir a visibilidade temporariamente.

Palavras-chave: Visibilidade. Poluição Atmosférica. PM₁₀. Umidade Relativa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região de Estudo	16
Figura 2 - Etapas da metodologia em fluxograma	17
Figura 3 - Interpolação Bilinear	19
Figura 4 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBRJ	22
Figura 5 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBGL	23
Figura 6 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBSC	23
Figura 7 - Média Anual de PM10 para a estação E17	25
Figura 8 - Média Anual de PM10 para a estação E21	25
Figura 9 - Média Anual de PM10 para a estação E23	26
Figura 10 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas do aeroporto do Galeão.	28
Figura 11 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas do aeroporto do Galeão.....	29
Figura 12 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas do aeroporto do Galeão.....	30
Figura 13 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas do aeroporto Santos Dumont.....	31
Figura 14 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas do aeroporto Santos Dumont.....	32
Figura 15 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas do aeroporto Santos Dumont.....	33
Figura 16 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas da base aérea de Santa Cruz.....	34
Figura 17 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas da base aérea de Santa Cruz.....	35
Figura 18 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas da base aérea de Santa Cruz.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo

METAR - Mensagem de Observação Meteorológica Rotineira

BR - Névoa úmida

FG - Nevoeiro

FU - Fumaça

VA - Cinzas vulcânicas

DU - Poeira extensa

SA - Areia

HZ - Névoa seca

DZ - Chuvisco

RA - Chuva

SN - Neve

SG - Grãos de neve

PL - Pelotas de gelo

GR - Granizo

GS - Granizo pequeno e/ou grãos de neve

PO - Poeira ou areia em redemoinhos

SQ - Tempestade

FC - Nuvem funil, como tornados ou trombas d'água

SS - Tempestade de areia

DS - Tempestade de poeira

TS - Trovoada, acompanhada de raios e relâmpagos

MP - Material particulado

INEA - Instituto Estadual do Ambiente

WHO - Organização Mundial da Saúde

RMRJ - Região Metropolitana do Rio de Janeiro

SBGL - Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão

SBRJ - Aeroporto Santos Dumont

SBSC - Base Aérea de Santa Cruz.

SIGQA - Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar

PM10 - Material Particulado menor ou igual a 10 micrômetros (µm)

CAVOK - Ceiling and Visibility OK

RH - Relative Humidity

VIS - Visibilidade

ACP - Análise de Componentes Principais

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

SMAC – Secretaria Municipal de Ambiente e Clima do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
2.2. DADOS UTILIZADOS	15
2.3. METODOLOGIA	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1. ANÁLISE DA VISIBILIDADE EM AEROPORTOS DA RMRJ	19
3.2. ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO (PM10)	22
3.3. ANÁLISE DA VISIBILIDADE UTILIZANDO FAIXAS DE UMIDADE	24
4. CONCLUSÃO	35
5. REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

A meteorologia desempenha um papel fundamental no cotidiano das pessoas e entender a dinâmica dos fenômenos meteorológicos e prever possíveis impactos para a mitigação de danos são fundamentais para o desenvolvimento das atividades humanas. Uma das áreas mais afetadas pelas constantes mudanças desses fenômenos é a aviação e todo o setor aéreo. Nesse contexto, o conhecimento de variáveis meteorológicas como vento, chuva e visibilidade são muito importantes para garantir a segurança e o melhor funcionamento desse setor, especialmente durante pousos e decolagens (ANAC, 2017). A visibilidade se destaca por seu impacto direto nas operações aéreas, especialmente durante pousos e decolagens, uma vez que visibilidade reduzida pode impedir a realização dessas etapas do voo.” (Kwasiborska et al., 2023). Segundo Wallace e Hobbs (2006), a visibilidade é definida como a maior distância em que um observador consegue identificar claramente um objeto escuro, de tamanho adequado, localizado próximo ao solo, quando esse objeto é observado contra o fundo do céu no horizonte. De acordo com Sonnemaker (2012), a visibilidade é influenciada pelo nível de transparência da atmosfera, sendo a visibilidade horizontal o alcance visual ao longo de todo o horizonte (360°), com o ponto de observação como referência.

De acordo com o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2020), os fenômenos de tempo presente que podem afetar a visibilidade são classificados como obscurecedores, sendo representados pelos seguintes códigos nos dados de Mensagem de Observação Meteorológica Rotineira (METAR): BR (névoa úmida), FG (nevoeiro), FU (fumaça), VA (cinzas vulcânicas), DU (poeira extensa), SA (areia) e HZ (névoa seca). A precipitação, que também impacta diretamente a visibilidade e as operações aéreas, são identificadas pelos códigos: DZ (chuvisco), RA (chuva), SN (neve), SG (grãos de neve), PL (pelotas de gelo), GR (granizo) e GS (granizo pequeno e/ou grãos de neve). Além desses, existem outros fenômenos meteorológicos que podem interferir nas condições de voo, cujos códigos incluem: PO (poeira ou areia em redemoinhos), SQ (tempestade), FC (nuvem (ns) - funil, como tornados ou

trombas d'água), SS (tempestade de areia), DS (tempestade de poeira) e TS (trovoada, acompanhada de raios e relâmpagos). Vale destacar que, além de impactar a visibilidade e a aviação, alguns desses fenômenos, como fumaça, poeira e névoa seca, também estão diretamente relacionados à qualidade do ar (WHO, 2016, 2021). Devido ao aumento rápido da população, ao trânsito cada vez mais intenso e ao avanço da indústria, as cidades têm notado um aumento grande na liberação de substâncias nocivas, como o material particulado (MP) e outros poluentes (WHO, 2021; CETESB, 2022).

No Brasil, embora ainda escassos, já existem estudos que comprovam essa relação. Em São Paulo, Miranda et al. (2017) mostraram que episódios influenciados por fumaça de queimada aumentam o PM_{2,5} e alteram as propriedades ópticas do aerossol, degradando a visibilidade. Na Amazônia, Rosário et al. (2019) demonstraram que a profundidade óptica do aerossol se intensifica durante a estação seca devido às emissões de queimadas, indicando redução significativa da transparência atmosférica.

A cidade do Rio de Janeiro, grande centro urbano do Brasil, enfrenta desafios significativos relacionados à poluição atmosférica, principalmente em regiões onde o tráfego de veículos e a densidade populacional são altas (SMAC – Secretaria Municipal de Ambiente e Clima do Rio de Janeiro, 2021). Segundo o Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2025), em diversas estações de monitoramento da cidade, foram registradas ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021), principalmente no que se refere ao MP e ozônio. Além disso, estudos indicam que a poluição atmosférica no Rio de Janeiro está relacionada à redução da visibilidade urbana, o que pode afetar tanto a estética da paisagem quanto a segurança viária e aérea (Maia; Netto; Costa, 2019; Cruz et al., 2024).

A poluição atmosférica, em níveis elevados, pode afetar, em ambiente urbano, as operações aeroportuárias (Won et al., 2020). A operação contínua de aeronaves, combinada com a circulação intensa de veículos terrestres contribui significativamente para a emissão de poluentes atmosféricos (Yim et al., 2015). Além de causar efeitos adversos à saúde humana, incluindo agravamento de doenças respiratórias, cardiovasculares e aumento da mortalidade prematura, e ao meio ambiente, com danos à vegetação, aos solos e à biodiversidade (BRASIL, 2014; WHO, 2021), os poluentes atmosféricos

também afetam a visibilidade da atmosfera de forma direta (Ibarra-Espinosa et al., 2022).

Assim, os objetivos do presente estudo são: 1) analisar a correlação entre poluição atmosférica e a redução da visibilidade em áreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro; 2) identificar o impacto do PM10 na deterioração da visibilidade; 3) comparar os dados das estações de monitoramento de qualidade do ar e os de visibilidade para entender a relação entre a concentração de poluentes e a perda de visibilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

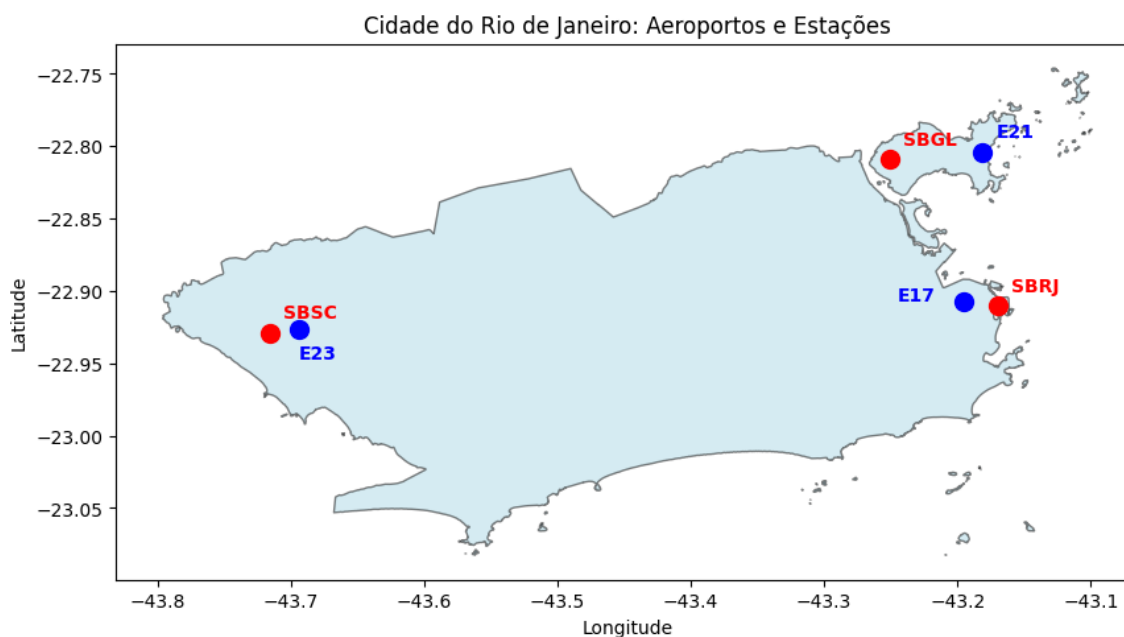
2.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), localizada entre aproximadamente 22°30' S e 23°00' S de latitude, e entre 42°30' W e 44°00' W de longitude. Na Figura 1, a área destacada em azul claro representa o recorte espacial analisado, dentro do qual são apresentados diversos pontos de interesse. As estações meteorológicas estão indicadas em azul escuro e os aeroportos em vermelho, facilitando a identificação e a distribuição espacial desses elementos.

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), conforme caracterização presente no relatório do Ipea “Projeto Governança Metropolitana – Oficina 1 RJ”, é apresentada com população de 11.835.708 habitantes (Censo 2010) e composição de 19 municípios naquele recorte.

As estações utilizadas no estudo são destacadas por pontos em azul escuro no mapa (Figura 1). A estação E17 (RJ – Centro) está situada na latitude 22.907° S e longitude 43.195° W. A estação E21 (RJ – Ilha do Governador) localiza-se em 22.804° S e 43.181° W. Já a estação E23 (RJ – Largo do Bodegão) encontra-se em 22.927° S e 43.694° W. Os aeroportos analisados são representados pelos pontos vermelhos: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão (SBGL), Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) e Base Aérea de Santa Cruz (SBSC).

Figura 1 - Região de Estudo



Região de estudo em azul claro, aeroportos em pontos vermelhos e estações em pontos azuis. Fonte: Autor.

2.2. DADOS UTILIZADOS

Os dados de visibilidade horizontal utilizados neste estudo foram coletados a partir do METAR para o período de 2004 à 2023 disponível em (<https://www.ogimet.com/index.phtml>). Essas mensagens são relatórios padronizados de condições meteorológicas observadas em aeroportos e fornecem informações cruciais, incluindo a visibilidade, para a aviação. As informações foram extraídas especificamente para os aeroportos de interesse, garantindo a relevância dos dados para a análise proposta (ICAO, 2017; WMO, 2021).

Complementarmente, os dados de poluição do ar foram obtidos no portal do Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar (SIGQA - <https://portalsiggar.inea.rj.gov.br>), do INEA-RJ. Para a poluição, foi analisada a variável de material particulado PM₁₀, definida como a fração de partículas inaláveis com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 micrômetros (µm), usualmente associadas a processos de combustão, ressuspensão de poeira e emissões antropogênicas (CETESB, s.d.). Esses dados são provenientes de estações de monitoramento automáticas: a estação E17, com período de dados

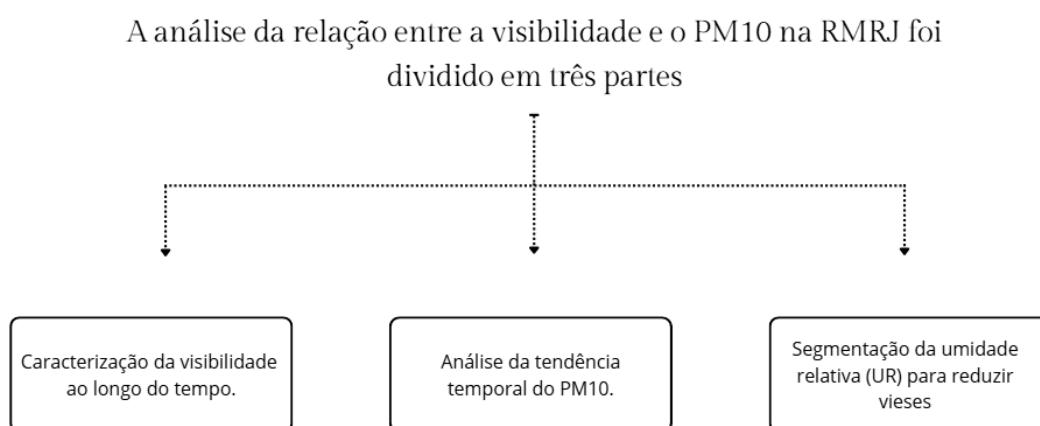
de 2000 a 2023; a estação E21 com dados de 2011–2023; e, por fim, a estação E23, referente a 2009–2023.

Por fim, os dados de umidade relativa do ar foram obtidos diretamente das reanálises do ERA5, especificamente a partir do conjunto ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present, para o período de 2004 a 2023 no nível de 1000 hPa. Esse produto apresenta cobertura espacial global completa, distribuída em grade regular de latitude–longitude, abrangendo de 90°N a 90°S e de 180°W a 180°E. A resolução espacial utilizada é de 0,25° × 0,25° (aproximadamente 31 km × 31 km na região subtropical), que corresponde à resolução operacional padrão do ERA5 para variáveis em níveis de pressão.

2.3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo focou na análise da relação entre a visibilidade horizontal e as concentrações de poluentes atmosféricos PM10 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Para isso, os dados foram processados e analisados em três etapas conforme explicitada no fluxograma da figura 2.

Figura 2 - Etapas da metodologia em fluxograma



Fluxograma explicitando as três principais partes de elaboração da metodologia.

Fonte: Autor.

Primeiramente, para caracterizar a variabilidade da visibilidade ao longo do tempo, foram gerados gráficos de barras indicando os números de dias em que a visibilidade horizontal ficou abaixo de 1 km. Posteriormente, gráficos da tendência média do PM10 foram construídos para indicar o comportamento destes poluentes em diferentes estações de qualidade do ar.

Por fim, com o objetivo de tornar a análise da visibilidade mais rigorosa e minimizar possíveis vieses associados à variação higrométrica da atmosfera, a umidade relativa do ar foi organizada em faixas distintas de valores menores que 60%, de 60% a 80% e maiores que 80%, antes da aplicação dos métodos estatísticos. Essa etapa é fundamental porque a umidade relativa exerce forte influência sobre o espalhamento da luz e, conseqüentemente, sobre a visibilidade (SUN et al., 2020). Assim, ao segmentar os dados em diferentes regimes de umidade, torna-se possível isolar este efeito e avaliar de forma mais precisa como a concentração de PM10 se relaciona com a visibilidade dentro de condições higrométricas específicas.

Para isso, foram utilizados arquivos no formato GRIB provenientes do ERA5, os quais foram lidos por meio de códigos na linguagem Python. A variável de interesse, a umidade relativa do ar, foi extraída do arquivo e submetida à interpolação bilinear (figura 3), de modo a estimar seu valor exatamente nas coordenadas das estações de monitoramento utilizadas no estudo. Essa interpolação foi necessária porque o modelo numérico opera em uma grade espacial e raramente coincide com as coordenadas exatas das estações. Após a interpolação, os dados foram convertidos para tabela, padronizando-se o formato das datas e exportando os resultados em arquivos para etapas posteriores.

Figura 3 - Interpolação Bilinear

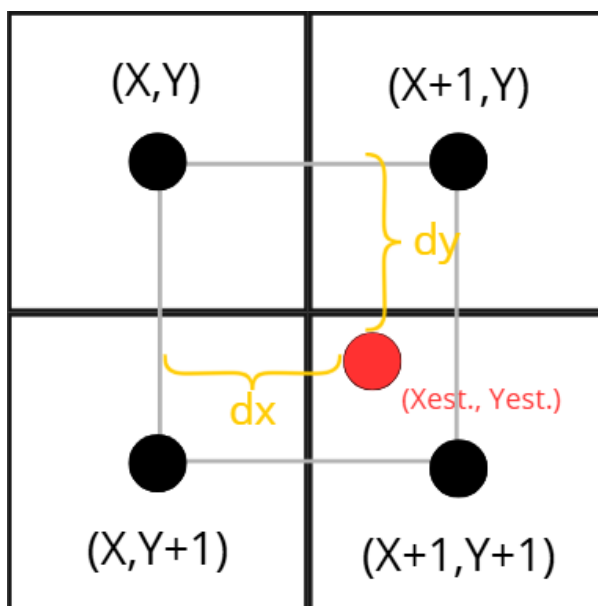


Imagem da interpolação bilinear utilizada mostrando o ponto vermelho como região de interesse e os cálculos das distâncias com os pontos médios das grades. Fonte: Autor.

Os dados METAR provenientes dos aeroportos SBRJ, SBSC e SBGL também foram processados. Esse processamento envolveu a leitura dos arquivos originais, a extração adequada das datas e horas, uma vez que alguns registros apresentavam índices anexados, e o tratamento dos valores textuais como “CAVOK”, substituídos por valores numéricos equivalentes à visibilidade máxima (9999 metros). Além disso, todos os valores foram convertidos para tipos numéricos, de modo a permitir cálculos estatísticos e agregações temporais posteriores, permitindo processar a base de dados unificada a partir do período analisado. Para isso, todas as séries foram convertidas para média diária, garantindo comparabilidade entre as fontes, que originalmente possuíam diferentes resoluções temporais. Uma vez padronizadas, as séries foram integradas em um único banco de dados, utilizando a data como chave comum. Assim, cada registro diário passou a conter simultaneamente: visibilidade com a média dos horários sinóticos, concentração de PM10 e umidade relativa interpolada.

Em seguida, para investigar como a umidade relativa modula a relação entre PM10 e visibilidade, a variável RH foi classificada em três faixas distintas

definidas heurísticamente levando em consideração a área de estudo e sua interação com o oceano: menor que 60%, entre 60% e 80% e maior ou igual a 80%. Essa categorização permitiu dividir os dados em grupos com características higrométricas diferentes, possibilitando o ajuste de modelos independentes para cada faixa e permitindo comparações mais robustas entre regimes atmosféricos.

A análise estatística central deste trabalho consistiu no ajuste de modelos de regressão linear simples para cada uma das três faixas de umidade relativa. Em cada grupo, a visibilidade (VIS) foi tratada como variável dependente, enquanto a concentração de PM10 foi utilizada como variável independente. O modelo linear adotado segue a forma geral da equação 1:

$$VIS = \beta_0 + \beta_1 \cdot PM10 \quad (1)$$

Os coeficientes do modelo foram estimados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (UFMG, s.d.). Esse método encontra os valores de β_0 e β_1 que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos. A solução matricial utilizada pelo algoritmo para calcular os coeficientes é dada pela equação 2:

$$\beta = (X^t \cdot X)^{-1} X^t \cdot Y \quad (2)$$

onde X representa a matriz de preditores (incluindo o termo constante) e Y representa o vetor de observações da visibilidade. Esse processo resulta na obtenção dos coeficientes da reta de regressão, bem como indicadores estatísticos como R^2 (coeficiente de determinação), p-valores, erros padrão e intervalos de confiança, permitindo avaliar a força e a significância da relação entre as variáveis.

Para fins de visualização, foram gerados gráficos de dispersão com as respectivas linhas de regressão, separados por faixa de umidade relativa. Com essas etapas, foi possível avaliar de forma quantitativa e visual como as condições de umidade relativa modificam o impacto das concentrações de PM10 na visibilidade atmosférica, estabelecendo um conjunto de análises consistente e fundamentado estatisticamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A visibilidade é um parâmetro meteorológico crítico para a segurança e a eficiência das operações aeroportuárias. A diminuição da visibilidade, seja por condições de neblina, chuva, poluição atmosférica ou outros fenômenos, pode causar atrasos, desvios e, em casos extremos, acidentes (Won et al., 2020).

3.1 ANÁLISE DA VISIBILIDADE EM AEROPORTOS DA RMRJ

Os gráficos do número de dias por ano com visibilidade igual ou inferior a 1 km nos aeroportos do SBGL, SBRJ e na SBSC mostram uma clara tendência de diminuição ao longo do tempo, conforme visto nas figuras 4, 5 e 6.

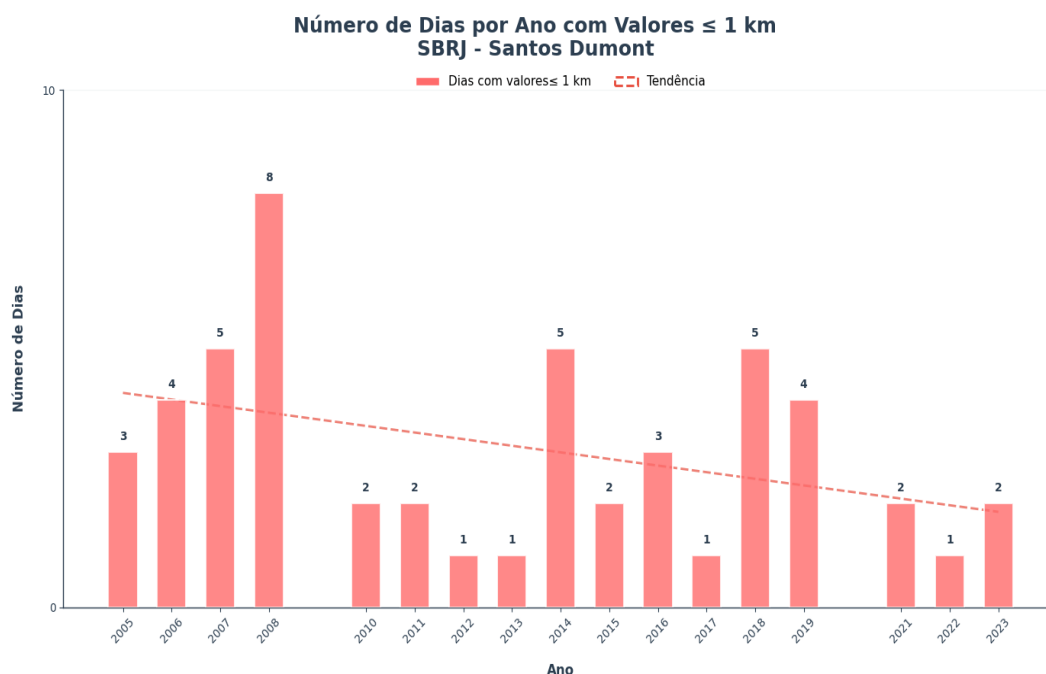
O MP em suspensão é reconhecido como um dos principais responsáveis pela formação de neblina seca e pela consequente redução da visibilidade, uma vez que aumenta o espalhamento e a atenuação da luz na atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2016). Esse efeito é especialmente relevante no contexto aeronáutico, pois a diminuição da visibilidade impacta diretamente as operações aéreas, como pousos e decolagens, conforme descrito também nos manuais operacionais e diretrizes meteorológicas da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2018).

A análise dos dados de visibilidade provenientes das mensagens METAR para os aeroportos do Rio de Janeiro revelou anos com redução significativa da visibilidade horizontal, especialmente em 2007, 2008 para SBRJ e SBGL e 2013 e 2014 para SBSC. Esses períodos coincidem com condições atmosféricas reconhecidas como mais secas no Sudeste do Brasil. De acordo com os boletins Climanálise do CPTEC/INPE, o ano de 2007 apresentou precipitações abaixo da média climatológica em grande parte da Região Sudeste durante o outono e o inverno, caracterizando um regime sazonal mais seco e favorecendo o acúmulo de aerossóis na baixa troposfera (CPTEC/INPE, 2007). Situação semelhante ocorreu em 2008, quando os boletins registraram novamente anomalias negativas de precipitação durante o inverno e início da primavera, indicando persistência de condições secas que podem ter intensificado episódios de

neblina seca (haze) e reduzido a visibilidade observada nos METAR (CPTEC/INPE, 2008).

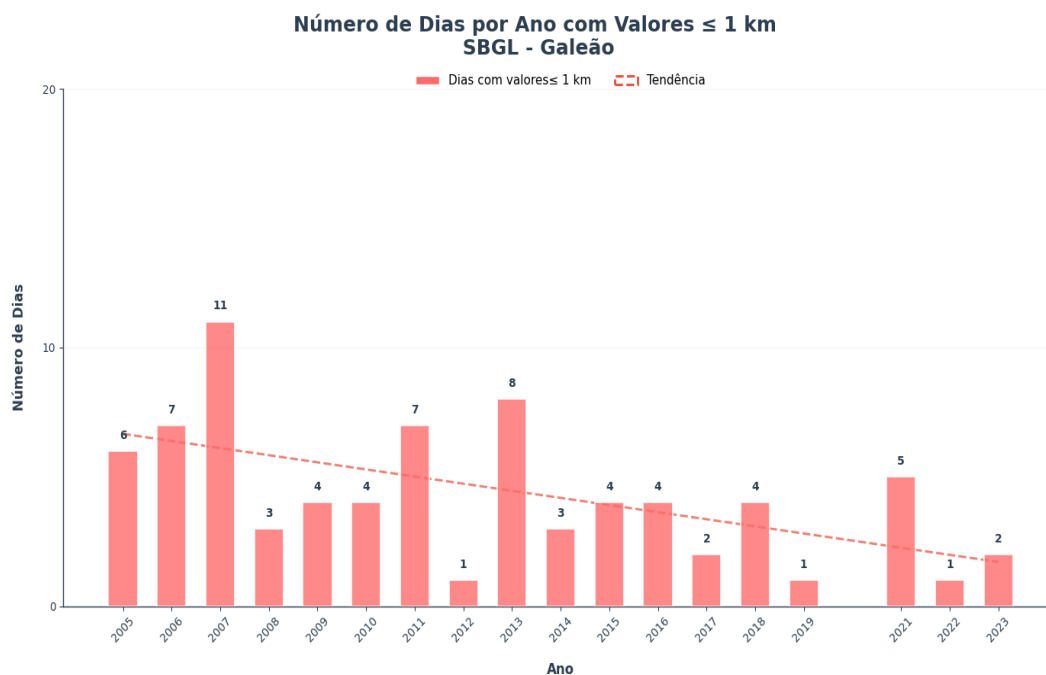
Para o período 2013–2014, a redução da visibilidade também encontra suporte nas condições meteorológicas regionais. Segundo Marengo et al. (2019), a Região Sudeste foi afetada por um dos eventos de seca mais intensos das últimas décadas, caracterizado por forte déficit hídrico e anomalias negativas de precipitação entre 2013 e 2014. Esse evento resultou em atmosfera mais estável e seca, com menor umidade relativa e maior concentração de partículas em suspensão, fatores que contribuem diretamente para a degradação da visibilidade atmosférica. Assim, os anos identificados nos METAR como críticos em termos de baixa visibilidade estão coerentemente associados a períodos reconhecidos de estiagem ou condições sazonais anormalmente secas no Sudeste.

Figura 4 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBRJ



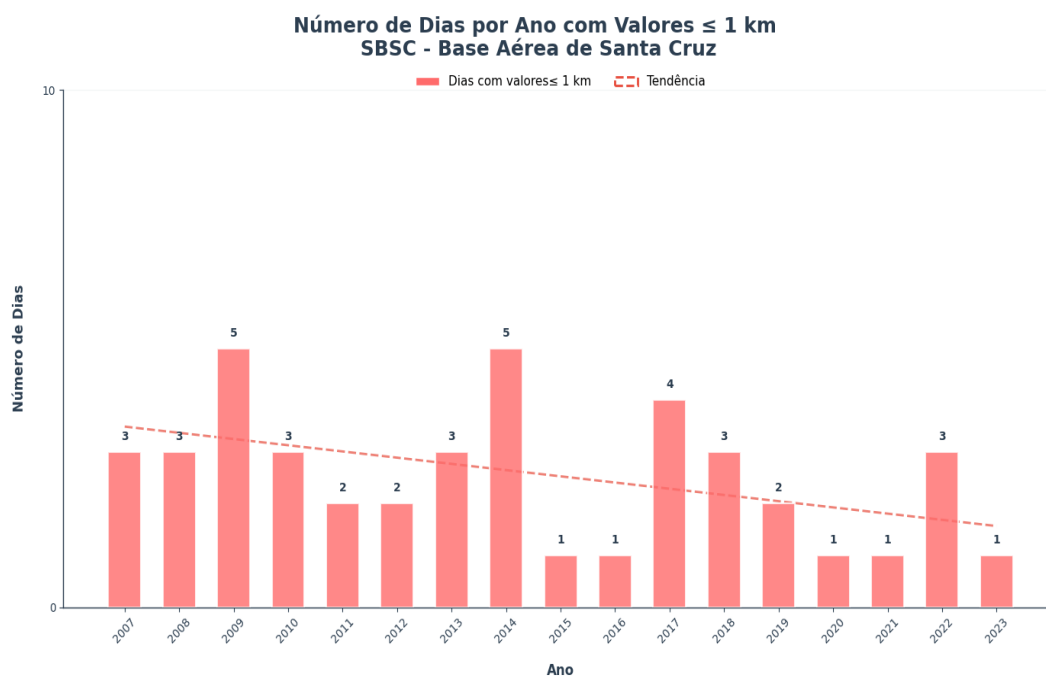
Anos de dados disponíveis no eixo X, número de dias dispostos em barras vermelhas e linha de tendência em vermelho tracejado. Fonte: Autor.

Figura 5 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBGL



Anos de dados disponíveis no eixo x, número de dias dispostos em barras vermelhas e linha de tendência em vermelho tracejado. Fonte: Autor.

Figura 6 - Número de dias por ano com valores de visibilidade menor ou igual a 1 km para o aeroporto SBSC



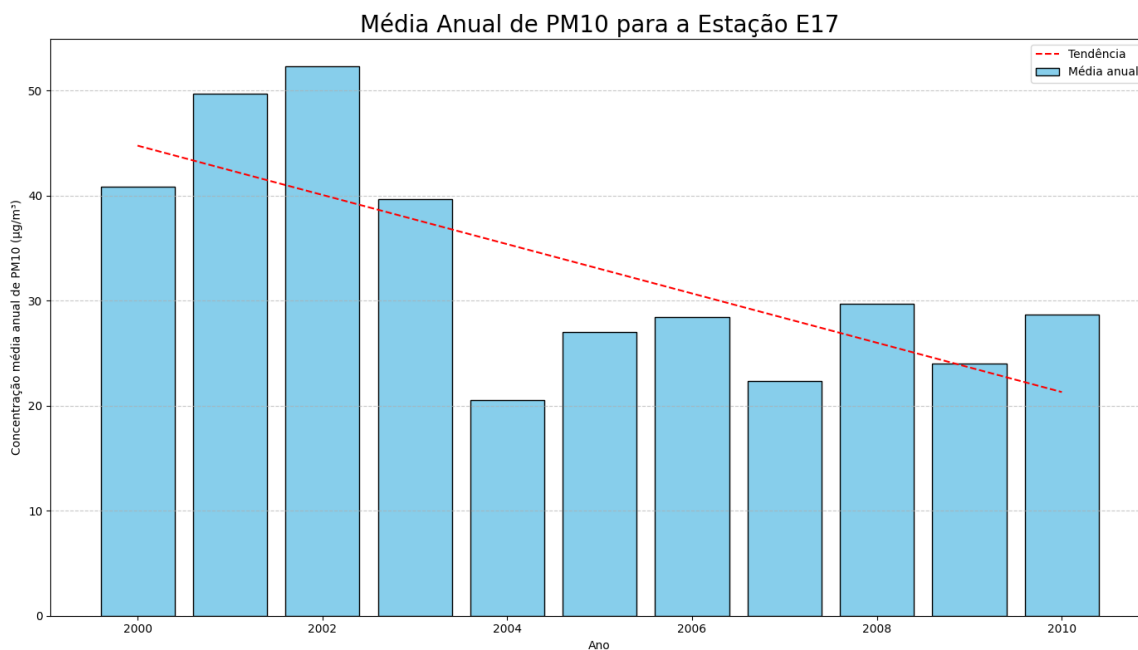
Anos de dados disponíveis no eixo X, número de dias dispostos em barras vermelhas e linha de tendência em vermelho tracejado. Fonte: Autor.

No SBGL, houve um pico de 11 dias com baixa visibilidade em 2007, mas o número de dias caiu drasticamente para 1 em 2022 e 2 em 2023. O aeroporto SBRJ registrou seu maior número de dias com visibilidade inferior a 1 km em 2008 (8 dias), mas nos anos mais recentes, os valores foram significativamente mais baixos. Na SBSC, a tendência de diminuição é igualmente evidente, apesar de picos ocasionais em anos como 2009 e 2014.

3.2 ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE MATERIAL PARTICULADO (PM10)

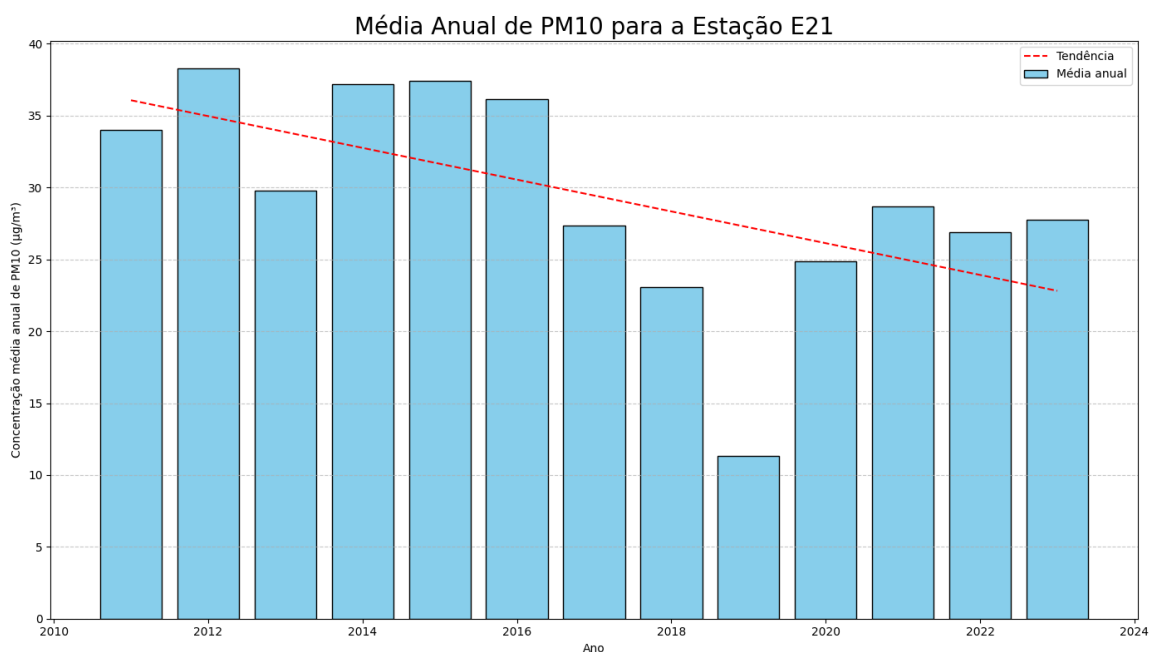
As imagens da média anual de PM10 para as estações de monitoramento E17, E21 e E23 reforçam os dados de visibilidade, mostrando uma clara tendência de queda na concentração do poluente ao longo dos anos, conforme visto nas figuras 7, 8 e 9. A estação E17, relacionada à área do aeroporto Santos Dumont, mostra uma tendência de queda na concentração de PM10. A estação E21, na Ilha do Governador, associada ao aeroporto Galeão, apresenta uma diminuição considerável na concentração de PM10 após picos em 2012 e 2013. A estação E23, na região de Santa Cruz, também revela uma tendência de queda, com os níveis de poluição diminuindo expressivamente após picos significativos em 2013 e 2014. A poluição atmosférica é um problema sério em áreas metropolitanas como o Rio de Janeiro, com o aumento da população e do trânsito contribuindo para a liberação de substâncias nocivas (MARTINS et al., 2017)

Figura 7 - Média Anual de PM10 para a estação E17



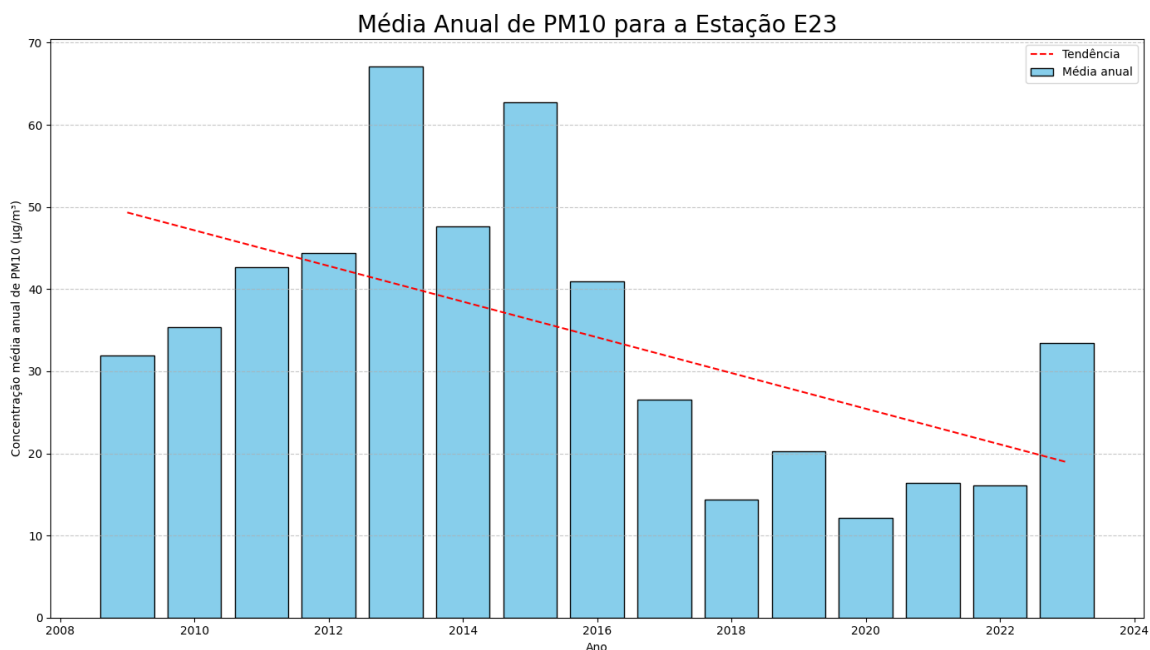
Anos de dados disponíveis no eixo X, concentração média de PM10 em barras azuis e linha de tendência tracejada em vermelho. Fonte: Autor.

Figura 8 - Média Anual de PM10 para a estação E21



Anos de dados disponíveis no eixo X, concentração média de PM10 em barras azuis e linha de tendência tracejada em vermelho. Fonte: Autor.

Figura 9 - Média Anual de PM10 para a estação E23



Anos de dados disponíveis no eixo X, concentração média de PM10 em barras azuis e linha de tendência tracejada em vermelho. Fonte: Autor.

3.3 ANÁLISE DA VISIBILIDADE UTILIZANDO FAIXAS DE UMIDADE

As figuras abaixo mostram a relação entre a visibilidade em metros e a concentração de PM10 em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em diferentes faixas de umidade relativa. A linha vermelha representa a regressão linear e a área em shaded o intervalo de confiança. A relação entre o Material Particulado (PM10) e a visibilidade atmosférica decorre principalmente de dois mecanismos físicos: 1) envolve a dispersão e absorção da radiação luminosa pelas partículas em suspensão, o que reduz diretamente o alcance visual ao aumentar o espalhamento da luz no percurso óptico; e 2) está associado à influência da umidade relativa, uma vez que parte dos aerossóis é higroscópica e tende a absorver água, aumentando de tamanho e intensificando o coeficiente de extinção atmosférica (Won et al., 2021).

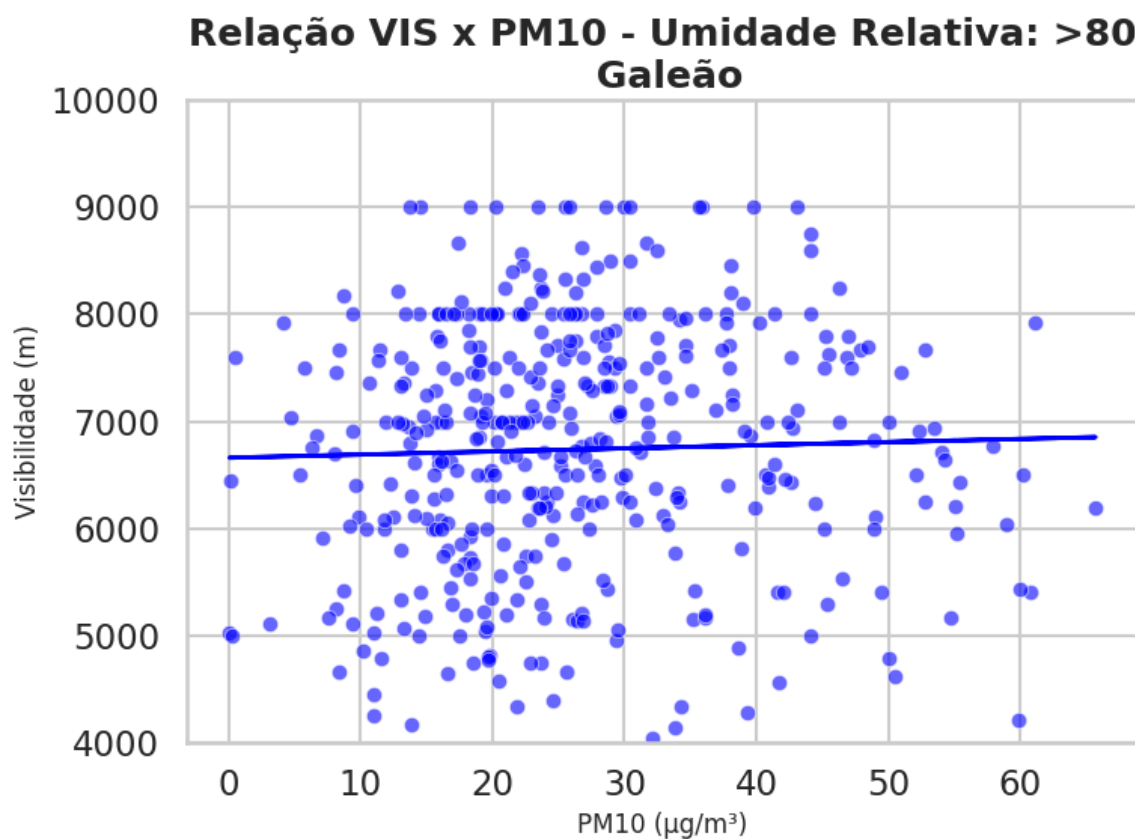
Esse papel modulador da umidade relativa sobre o comportamento das partículas também foi evidenciado por NOGAROTTO et al. (2020). Por meio de Análise de Componentes Principais (ACP), os autores mostraram que variáveis higrométricas têm influência significativa na dinâmica do MP10, contribuindo para modificar tanto sua concentração quanto seus efeitos ópticos na atmosfera.

Assim, a degradação da visibilidade resulta tanto da presença do aerossol em faixas de menor umidade quanto da interação deste com condições de elevada umidade. A exceção a este cenário é o SBSC, que demonstrou elevação da visibilidade nas duas primeiras faixas de umidade, indicando que outros fatores dominam sobre a variável de visibilidade.

O aumento na concentração de PM₁₀ leva à diminuição da visibilidade, pois há a presença de partículas que espalham e absorvem mais a luz. Isso fica representado por uma inclinação negativa na linha de regressão. A umidade relativa é outro fator que se relaciona fortemente com o PM₁₀. Conforme visto por Souza et al. (2021), a umidade relativa é um fator de suma importância quando relacionada com aerossóis, porque ela afeta diretamente as propriedades físicas e ópticas das partículas suspensas na atmosfera. A umidade relativa altera o tamanho, a composição, o comportamento higroscópico e o espalhamento da luz pelos aerossóis, modificando tanto sua detecção óptica quanto seus efeitos meteorológicos.

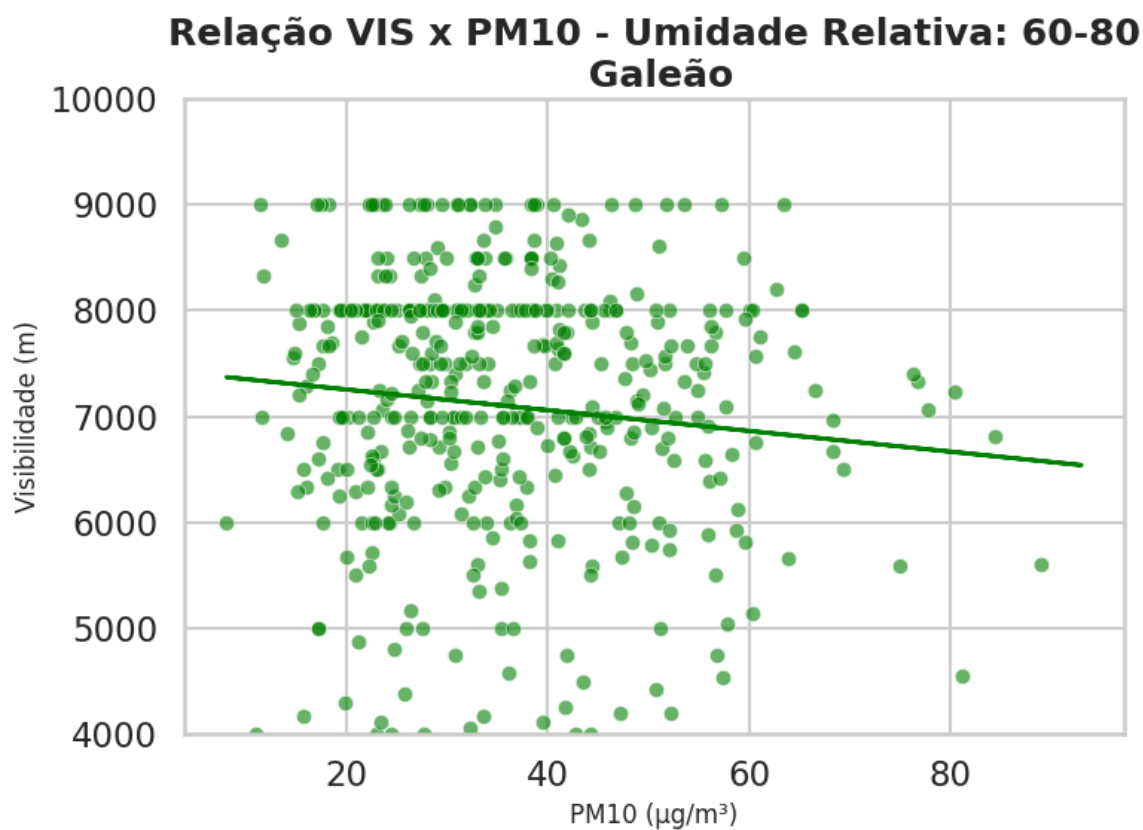
Analisando a Figura 10, é perceptível uma leve tendência positiva ou praticamente próxima a zero e uma grande dispersão de dados. Isso indica que, em condições onde a umidade relativa é superior a 80%, a visibilidade pode estar sendo dominada por fenômenos meteorológicos, como o crescimento higroscópico de partículas e a intensificação do espalhamento da radiação causada pela alta umidade, processos amplamente documentados por Zieger et al. (2013) e Won et al. (2021). Quando se analisa a Figura 11, é possível ver uma clara tendência negativa, ou seja, a visibilidade diminui conforme o PM₁₀ aumenta. Já na Figura 12, observa-se uma inclinação negativa mais acentuada do que em outras faixas de umidade, indicando forte redução de visibilidade com o aumento do PM₁₀ em condições de ar relativamente mais seco.

Figura 10 - Relação da Visibilidade com o PM₁₀ na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas do aeroporto do Galeão.



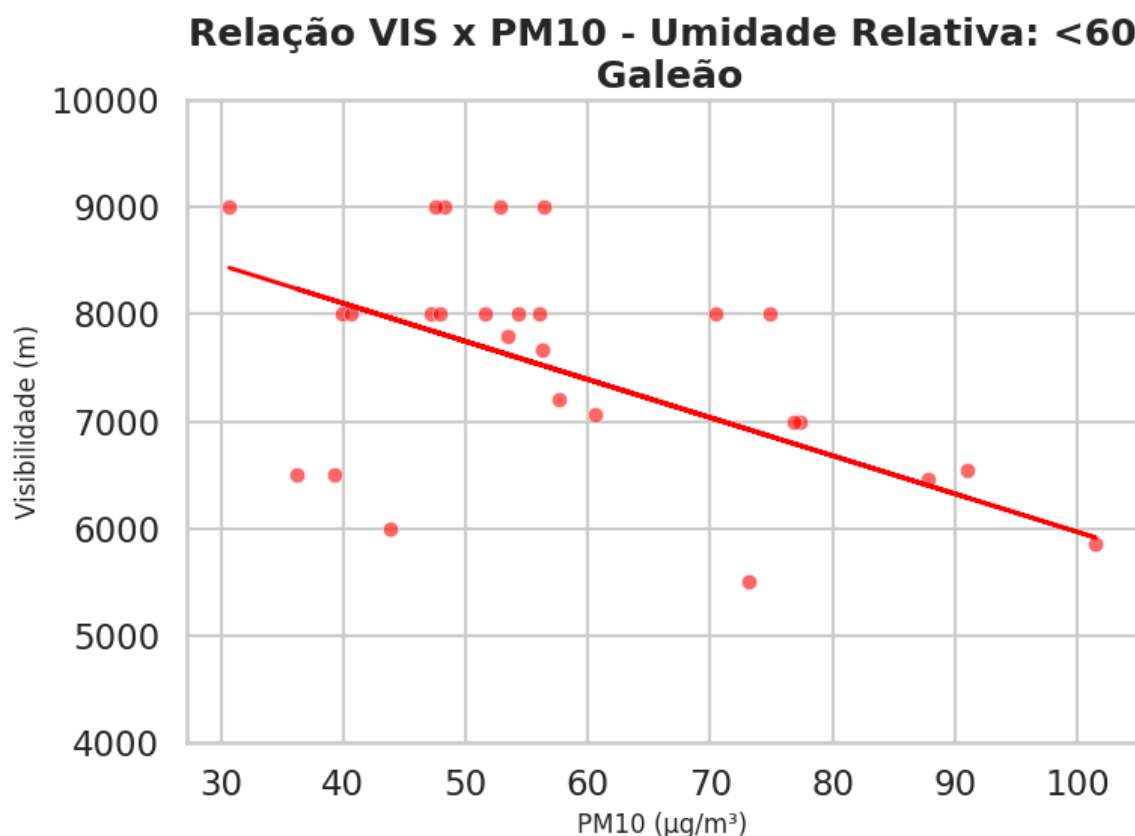
Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos azuis e linha de tendência em azul. Fonte: Autor.

Figura 11 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas do aeroporto do Galeão.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos verdes e linha de tendência em verde. Fonte: Autor.

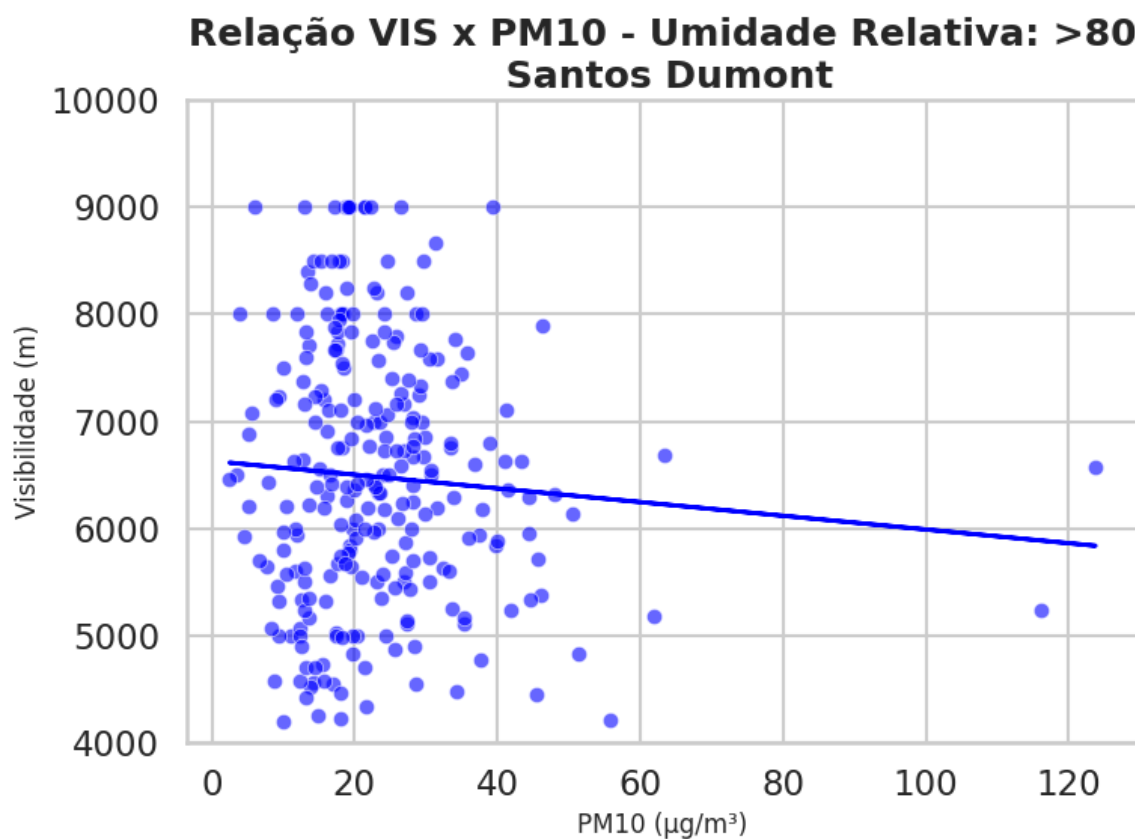
Figura 12 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas do aeroporto do Galeão.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos vermelhos e linha de tendência em vermelho. Fonte: Autor.

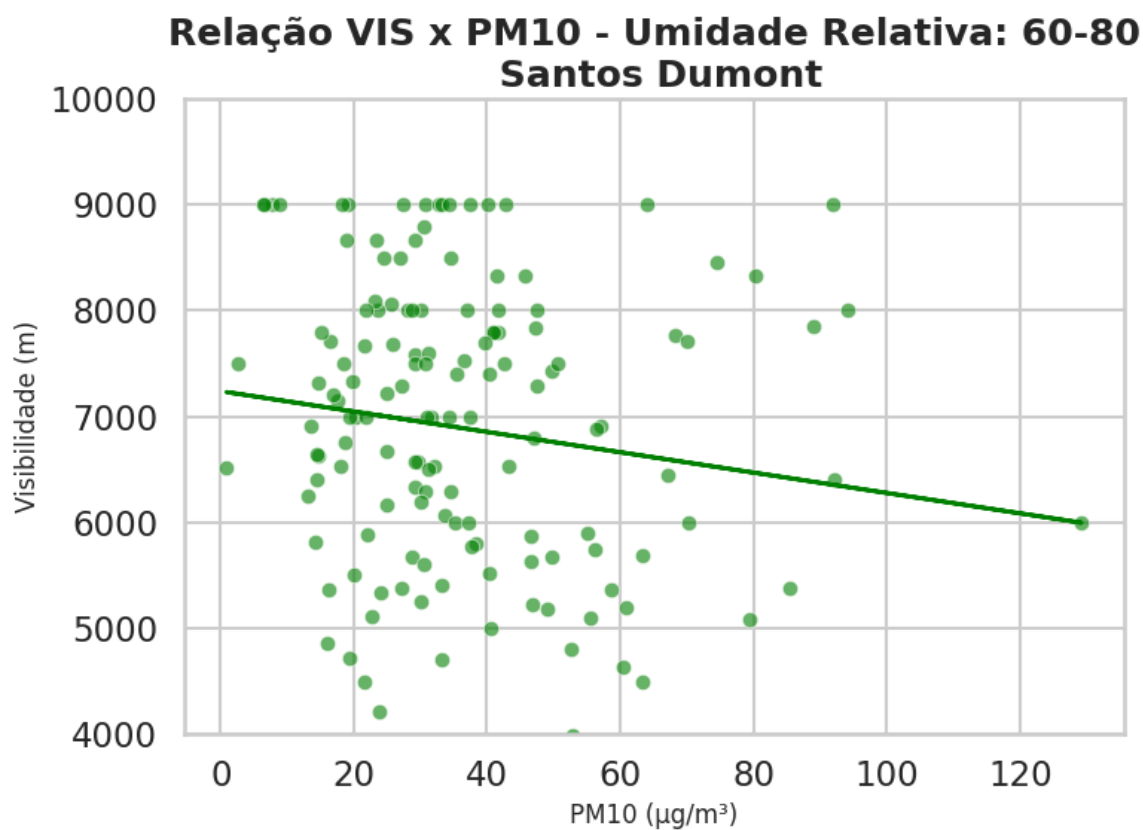
Para a região do aeroporto de Santos Dumont, as mudanças são perceptíveis. A figura 13 evidencia uma clara tendência de queda na visibilidade com o aumento do PM10 para uma faixa de umidade de 80%. Há uma elevada concentração de pontos em baixas concentrações de PM10, indicando que mesmo com pouco material particulado, a visibilidade tende a ser mais dispersa devido a formação de névoa ou neblina. Para as demais faixas de umidade, evidenciadas nas figuras 14 e 15 respectivamente, a tendência de queda se acentua conforme a umidade diminui, a dispersão é mais alta, sugerindo que outros fatores podem ter contribuído para uma menor visibilidade como o material particulado.

Figura 13 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas do aeroporto Santos Dumont.



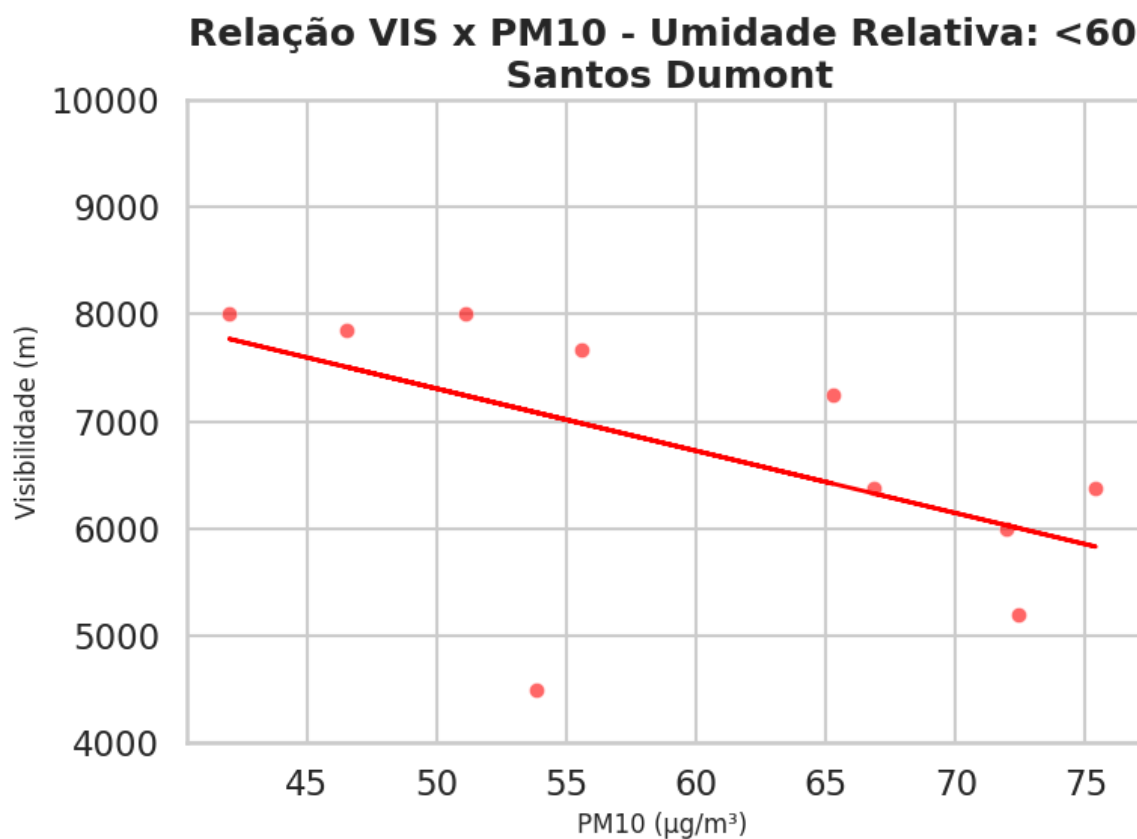
Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos azuis e linha de tendência em azul. Fonte: Autor.

Figura 14 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas do aeroporto Santos Dumont.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos verdes e linha de tendência em verde. Fonte: Autor.

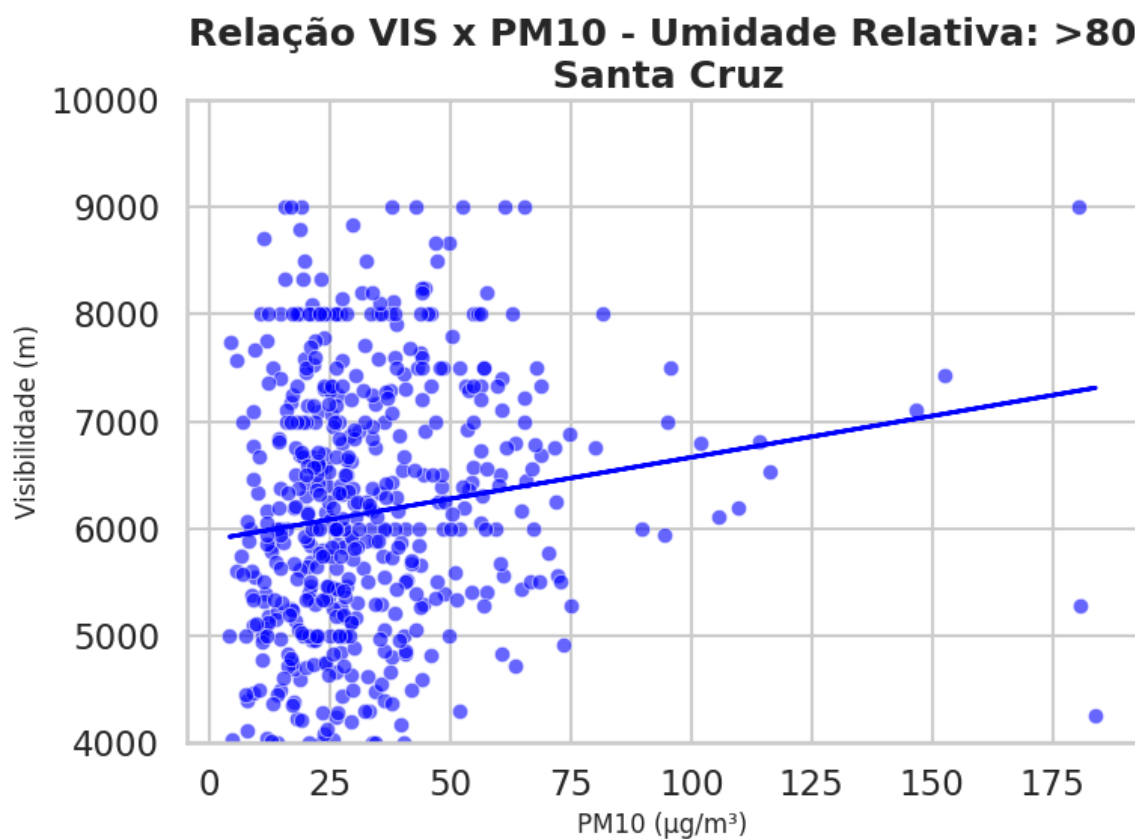
Figura 15 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas do aeroporto Santos Dumont.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos vermelhos e linha de tendência em vermelho. Fonte: Autor.

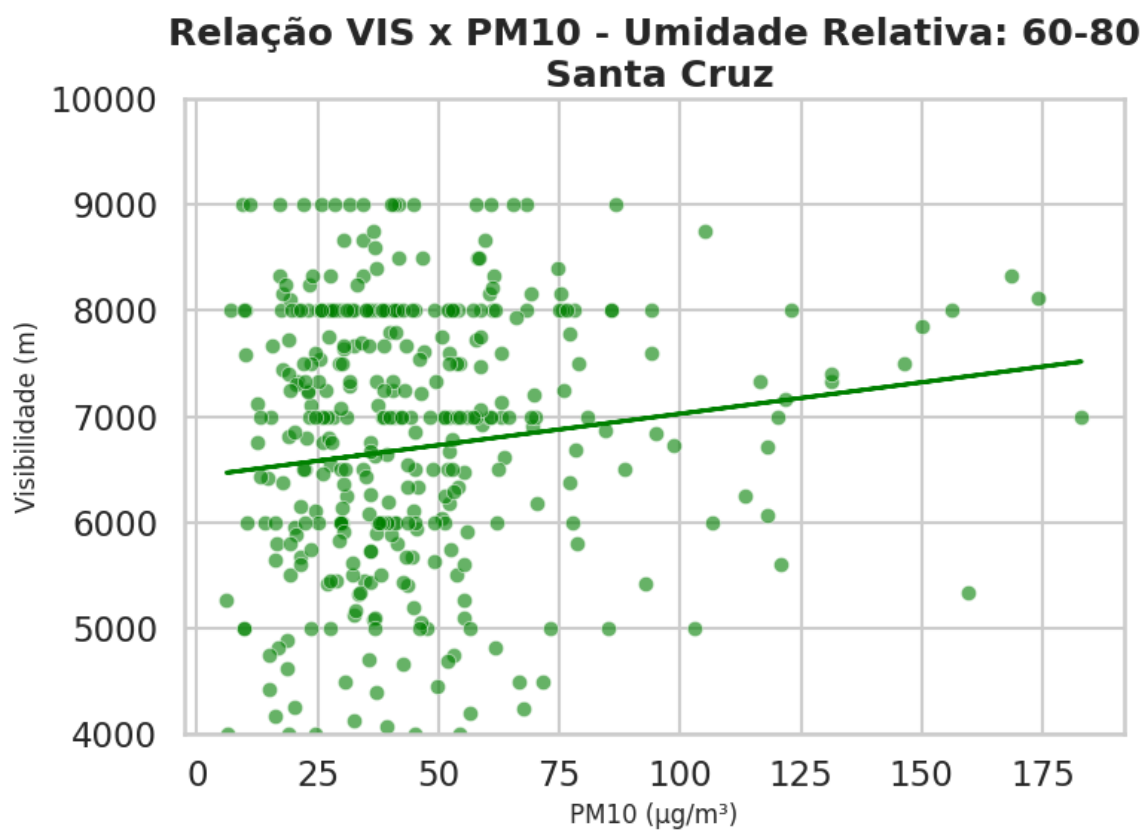
Ao analisar a região da Base Aérea de Santa Cruz, observa-se que, ao contrário do que ocorre em Galeão e Santos Dumont, os resultados apresentam uma clara tendência de aumento nas faixas de maior umidade, superiores a 80% e entre 60% e 80%, enquanto há uma redução significativa na faixa inferior a 60%.

Figura 16 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior que 80% para áreas da base aérea de Santa Cruz.



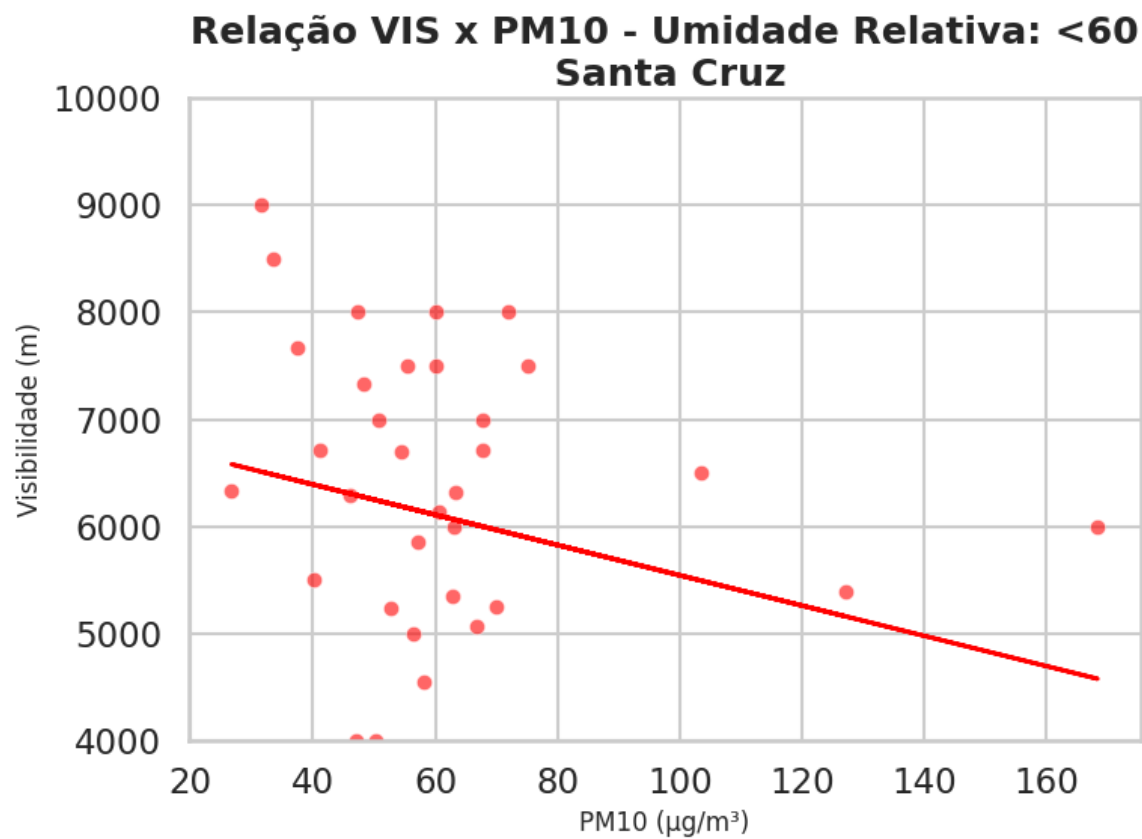
Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos azuis e linha de tendência em azul. Fonte: Autor.

Figura 17 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior entre 60% e 80% para áreas da base aérea de Santa Cruz.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos verdes e linha de tendência em verde. Fonte: Autor.

Figura 18 - Relação da Visibilidade com o PM10 na faixa de umidade relativa maior menor que 60% para áreas da base aérea de Santa Cruz.



Visibilidade em metros no eixo Y, valores de PM10 em pontos vermelhos e linha de tendência em vermelho. Fonte: Autor.

4. CONCLUSÃO

Este estudo confirmou a forte correlação entre a diminuição da concentração de material particulado (PM10) e a melhoria da visibilidade nos aeroportos e regiões da Grande Rio de Janeiro. A análise dos dados demonstra que a tendência de melhoria na qualidade do ar sugere que as medidas de controle de poluição têm tido um impacto positivo e direto.

Apesar da tendência geral de melhoria, a pesquisa também ressalta que períodos de seca prolongada podem influenciar temporariamente essa dinâmica. A falta de chuvas pode intensificar a concentração de poluentes e partículas de poeira no ar, resultando em dias de visibilidade reduzida. Picos de baixa visibilidade observados em anos como 2007 e 2014 reforçam essa relação, pois coincidem com períodos de seca no Rio de Janeiro.

Adicionalmente, a metodologia de regressão linear, ajustada por faixas de umidade relativa, destacou que a umidade relativa é um fator crítico que modula o impacto do PM10 na visibilidade. Em condições de umidade mais seca (<60%) a inclinação negativa da linha de regressão foi mais acentuada (Figuras 12 e 15), indicando que o aumento do PM10 provoca uma forte redução na visibilidade devido à dispersão e absorção da luz pelas partículas. Em condições de alta umidade (>80%) a relação com o PM10 foi mais fraca (Figura 10) ou até positiva em Santa Cruz (Figura 16), sugerindo que a visibilidade nessas condições é frequentemente dominada por fenômenos meteorológicos como névoa ou neblina, e não apenas pela concentração de poluentes.

Em suma, a compreensão dessa relação é fundamental para o planejamento e a segurança operacional das atividades de voo, além de destacar os benefícios das políticas ambientais para a saúde pública e a aviação. A contínua vigilância e a implementação de medidas eficazes para o controle de emissões são essenciais para manter e melhorar a qualidade do ar na RMRJ.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Meteorologia e a segurança de voo. Brasília: ANAC, 05 set. 2017 (atualizado em 05 set. 2021). Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/veja-mais/meteorologia-e-a-seguranca-de-voo>. Acesso em: 30 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Poluição atmosférica e saúde humana. Brasília: MS, 2014. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/poluicao_atmosferica_SUS_saude_ambiental.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Poluentes – Material Particulado (MP10). [S. l.: s. n.], s.d. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2022. São Paulo: CETESB, 2022.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=download>. Acesso em: 22 ago. 2025.

CPTEC/INPE. Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista: INPE, 2007. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/>.

CPTEC/INPE. Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista: INPE, 2008. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/>.

CRUZ, A. H. de L. et al. Black carbon and particulate matter concentrations: air pollution levels in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 35, n. 08, p. e-20240029, 2024.

DE MIRANDA, R. M. et al. The relationship between aerosol particles chemical composition and optical properties to identify the biomass burning contribution to fine particles concentration: a case study for São Paulo city, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 1, p. 6, 2017.

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Como decodificar o METAR e o SPECI. Disponível em: <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/como-decodificar-o-metar-e-o-speci/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IBARRA-ESPINOSA, S. et al. Atmospheric effects of air pollution during dry and wet periods in São Paulo. *Environmental Science: Atmospheres*, v. 2, n. 2, p. 215-229, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/rio-de-janeiro.html>. Acesso em: 24 set. 2025.

ICAO – International Civil Aviation Organization. Manual of Aeronautical Meteorological Practice (Doc 8896). Montreal: ICAO, 2017.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Relatório da Qualidade do Ar – RQAr 2009. Rio de Janeiro: INEA, 2009. Disponível em: https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/RQAr_2009.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar (SIGQA). Rio de Janeiro: INEA. Disponível em: <https://portalsiggar.inea.rj.gov.br/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

IPEA. Projeto Governança Metropolitana – Oficina 1 RJ. Caracterização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Rio de Janeiro: Ipea, 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/projeto_governanca_oficina1_rj.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

KWASIBORSKA, A. et al. The influence of visibility on the opportunity to perform flight operations with various categories of the Instrument Landing System. *Sensors*, v. 23, n. 18, Article 7953, 2023. doi:10.3390/s23187953.

MAIA, J. L. M. M.; NETTO, V. M.; COSTA, B. L. G. da. Forma urbana e poluição atmosférica: impactos na cidade do Rio de Janeiro. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, p. e20180145, 2019.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought events in Brazil 2011–2019. *Atmosphere*, v. 10, n. 11, p. 642, 2019.

MARTINS, E. M. et al. Concentrações de poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro em relação a normas nacionais e internacionais. *Revista Internacional de Ciências*, v. 7, n. 1, p. 32-48, 2017.

NOGAROTTO, D. C.; LIMA, M. R. G.; POZZA, S. A. Análise de componentes principais para verificar relação entre variáveis meteorológicas e a concentração de MP10. *Holos*, v. 1, p. 1-17, 2020.

RIO DE JANEIRO (Município). Secretaria Municipal de Ambiente e Clima. Relatório de Qualidade do Ar 2021. Rio de Janeiro: SMAC, 2021. Disponível em: <https://ambienteclima.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/81/2024/11/Relatorio-Qualidade-do-Ar-2021.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2025.

ROSÁRIO, N. E. et al. Aerosol optical depth retrievals in central Amazonia from a multi-filter rotating shadow-band radiometer calibrated on-site. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 12, n. 2, p. 921-934, 2019.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

SONNEMAKER, J. B. Meteorologia: PP – PC – IFR – PLA. São Paulo: ASA, 2012. 248 p.

SOUZA, A. et al. Relação entre profundidade óptica do aerossol e precipitação tendo a umidade relativa como fator de influência. [S. l.: s. n.], 2021.

SUN, X. et al. Quantifying the influences of PM_{2.5} and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East China. *Atmosphere*, v. 11, n. 5, p. 461, 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Estatística. Regressão Linear Simples e Método dos Mínimos Quadrados. Belo Horizonte: UFMG, s.d. Disponível em: <https://www.est.ufmg.br/ftp/fcruz/ep/Cap11.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006. Cap. 6.

WHO – World Health Organization. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Geneva: WHO, 2016.

WHO – World Health Organization. Global Air Quality Guidelines. Geneva: WHO, 2021.

WHO – World Health Organization. Health impacts of air pollution. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/>. Acesso em: 03 dez. 2025

WMO – World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Geneva: WMO, 2018.

WMO – World Meteorological Organization. Manual on Codes: International Codes, Volume I.1 – Part A (WMO No. 306). Geneva: WMO, 2021.

WON, W.-S. et al. Impact of fine particulate matter on visibility at Incheon International Airport, South Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 20, n. 5, p. 1048-1061, 2020.

WON, W.-S. et al. Hygroscopic properties of particulate matter and effects of their interactions with weather on visibility. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 16401, 2021.

YIM, S. H. L. et al. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. *Atmospheric Environment*, v. 116, p. 62-72, 2015.

ZIEGER, P. et al. Effects of relative humidity on aerosol light scattering. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 10609–10632, 2013. DOI: 10.5194/acp-13-10609-2013.