CARLOS CESAR TAVARES

CONCENTRAÇÕES DE MP2,5 E MP10 EM ÁREA PORTUÁRIA: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E METEOROLÓGICAS

SANTOS

2026

CARLOS CESAR TAVARES

CONCENTRAÇÕES DE $MP_{2,5}$ E MP_{10} DURANTE A MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS SÓLIDOS NO PORTO DE SANTOS: CONDIÇÕES OPERACIONAIS E METEOROLÓGICAS

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada à Programa de Stricto Sensu de Saúde e Meio Ambiente da Universidade Metropolitana de Santos, para obtenção de título de Mestre.

ORIENTADOR: *PROF. DR. EDGAR MAQUIGUSSA*

SANTOS

2026

FICHA CATALOGRÁFICA - BIBLIOTECA DA UNIMES

Bibliotecário: xxxxxxxxxxx – CRB-xxxxxxx

XXXXXX

Sobrenome, Nome

Título da dissertação / Nome Completo. Santos, SP : [s.n.], Ano.

Orientador : Nome do Orientador

Dissertação (Mestrado Profissional) Universidade Metropolitana de Santos.

1. Palavra chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave I. Sobrenome, Nome do Orientador. II. Universidade Metropolitana de Santos. III. Título.

Título em inglês: $PM_{2.5}$ AND PM_{10} CONCENTRATIONS DURING SOLID BULK HANDLING AT THE PORT OF SANTOS: OPERATIONAL AND METEOROLOGICAL CONDITIONS

Keywords:

- Particulate matter;
- Air pollution;
- Port activities;
- Port of Santos

Titulação: Mestrado Profissional em Saúde e Meio Ambiente

Banca examinadora: Prof Dr Danilo Candido de Almeida

Prof Dr Clayton Gerber Mangini

Prof Dr Edgar Maquigussa

Data da defesa: **04/09/2026**

Universidade Metropolitana de Santos

Mantida pelo Centro de Estudos Unificados Bandeirante

FUNDADORA

Profª. Rosinha Garcia de Siqueira Viegas

MANTENEDOR

Prof. Rubens Flávio de Siqueira Viegas

REITORIA

Profª. Renata Garcia de Siqueira Viegas

Reitora

Profª. Elaine Marcílio Santos

Pró-Reitora Acadêmica

Prof. Rubens Flávio de Siqueira Viegas Júnior

Pró-Reitor Administrativo

Prof. Gustavo Duarte Mendes

Direção Acadêmica

Coordenador do Programa de Mestrado de Saúde e Meio Ambiente

PROGRAMA DE STRICTO SENSU EM SAÚDE E MEIO AMBIENTE DA UNIVERSIDADE METROPOLITANA DE SANTOS

BANCA EXAMINADORA E ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

A sessão pública de defesa da dissertação de mestrado profissional intitulada de "**CONCENTRAÇÕES DE $MP_{2,5}$ E MP_{10} DURANTE A MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS SÓLIDOS NO PORTO DE SANTOS: CONDIÇÕES OPERACIONAIS E METEOROLÓGICAS**", do discente Carlos Cesar Tavares, orientado pelo Prof. Dr. Edgar Maquigussa, foi realizada na data abaixo informada no anfiteatro do Programas de Stricto Sensu da Universidade Metropolitana de Santos, tendo o candidato cumprido, previamente, todas as exigências regimentais do Programa de Stricto Sensu de Saúde e Meio Ambiente, de acordo com a secretaria de pós-graduação da instituição. Realizada a apresentação da dissertação e arguição do publica do candidato, os membros da banca em reunião fechada deliberam e emitiram parecer abaixo.

Banca examinadora:	**Resultado:**	**Assinatura**
Prof. Dr. Danilo Cândido de Almeida	( ) Aprovado ( ) Reprovado	
Prof. Dr. Clayton Gerber Mangini	( ) Aprovado ( ) Reprovado	
Prof. Dr. Edgar Maquigussa	( ) Aprovado ( ) Reprovado	

Homologação do resultado pelo presidente da banca examinadora:

( ) Aprovado ( ) Reprovado

Prof. Dr. Edgar Maquigussa

Presidente da banca examinadora

Data da defesa: 04/09/2026

PROGRAMA DE STRICTO SENSU EM SAÚDE E MEIO AMBIENTE DA UNIVERSIDADE METROPOLITANA DE SANTOS

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E DO PRODUTO

Título da dissertação: Concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} durante a movimentação de granéis sólidos no Porto de Santos: condições operacionais e meteorológicas.

Linha de Pesquisa: Fatores de risco à saúde na indústria da cadeia de petróleo

Projeto de Pesquisa do Orientador: Análise de toxicologia ambiental na região portuária e petroquímica

Produto(s) gerado(s): Relatório técnico executivo intitulado "Monitoramento de material particulado em áreas relacionadas à movimentação de granéis sólidos".

Classificação da Produto

Critério	Justificar
Inserção social e econômico:	Aborda a saúde ambiental e ocupacional em uma atividade de grande relevância econômica para Santos e para o país.
Impacto – realizado:	Sistematizou os resultados da pesquisa em um relatório técnico direcionado aos gestores de terminais portuários.
Impacto – potencial:	Poderá apoiar o monitoramento ambiental, o controle de emissões e a prevenção de riscos ambientais e ocupacionais.
Aplicabilidade - Abrangência realizada:	Foi elaborado para terminais que movimentam granéis sólidos no Porto de Santos.
Aplicabilidade - Abrangência potencial:	Poderá ser utilizado por outros portos, terminais logísticos, áreas industriais e órgãos ambientais.
Aplicabilidade – Replicabilidade:	O modelo pode ser reproduzido e atualizado periodicamente em diferentes instalações e condições operacionais.
Inovação:	Apresenta inovação incremental ao integrar dados ambientais, operacionais e meteorológicos em um instrumento voltado à gestão portuária.
Complexidade:	Possui complexidade média, pois integra conhecimentos de saúde ambiental, operações portuárias, monitoramento de material particulado e meteorologia.

PROGRAMA DE STRICTO SENSU EM SAÚDE E MEIO AMBIENTE DA UNIVERSIDADE METROPOLITANA DE SANTOS

TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, pelo amor, apoio e incentivo constantes ao longo desta caminhada; ao meu primo Carlos Alberto (Carlito), por sempre ter sido um exemplo a ser seguido e por ter me direcionado ao caminho do conhecimento; e ao meu primo Antônio, ao meu avô e ao meu pai, que sempre foram exemplos de vida e caráter e por quem tenho profundo respeito e admiração.

Dedico-o também a todos que acreditaram em mim, mesmo nos momentos em que eu próprio duvidei, e que compreenderam minhas ausências e dificuldades durante este percurso.

Por fim, dedico esta conquista àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica. Este trabalho representa não apenas a conclusão de uma etapa, mas também o resultado do carinho, da confiança e do apoio que recebi ao longo do caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força, sabedoria e serenidade concedidas durante esta trajetória.

À minha mãe, sem a qual nada disso seria possível, agradeço pelo amor incondicional, pela paciência e pelo apoio em todos os momentos. Cada palavra de incentivo foi essencial para que eu pudesse superar os desafios e concluir esta etapa.

Ao meu orientador, professor Edgar Maquigussa, agradeço pela orientação atenta, pela disponibilidade, pelo conhecimento compartilhado e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Sua dedicação e confiança foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Mestrado em Saúde e Meio Ambiente da UNIMES, agradeço pelos ensinamentos e pelas reflexões que contribuíram significativamente para a minha formação acadêmica e profissional. Agradeço também a todos os professores dos cursos de graduação em Educação Física e Enfermagem, que contribuíram para a construção do meu conhecimento e para sua aplicação ética em benefício da sociedade e de um mundo melhor.

Aos colegas e amigos, agradeço pela parceria, pelo apoio, pelas conversas e pela troca de experiências. A presença de vocês tornou esta caminhada mais leve e significativa.

Aos participantes e às instituições que contribuíram para a pesquisa, agradeço pela disponibilidade, confiança e colaboração. Sem essa participação, a realização deste estudo não teria sido possível.

À Fundação Centro de Excelência Portuária de Santos (CENEP), agradeço pela concessão da bolsa de mestrado, cujo apoio foi fundamental para a realização desta pesquisa e para o desenvolvimento da minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta trajetória. Por cada gesto de apoio, incentivo e compreensão, registro aqui minha sincera gratidão.

FINANCIAMENTO

Este estudo contou com o apoio financeiro da **Fundação Centro de Excelência Portuária de Santos** (CENEP), por meio da concessão de bolsa de mestrado ao discente Carlos Cesar Tavares e da disponibilização de recursos para a execução do projeto.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA - BIBLIOTECA DA UNIMES 3
BANCA EXAMINADORA E ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL 5
FICHA DE CLASSIFICAÇÃO DA DISSERTAÇÃO E DO PRODUTO 6
TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO 7
DEDICATÓRIA 8
AGRADECIMENTOS 9
FINANCIAMENTO 10
SUMÁRIO 11
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS 13
LISTA DE FIGURAS 14
LISTA DE TABELAS 15
RESUMO 16
ABSTRACT 17
1. INTRODUÇÃO 18
2. REVISÃO DE LITERATURA 19
3. JUSTIFICATIVA 25
4. OBJETIVOS 27
4.1 Objetivo geral 27
4.2 Objetivos específicos 27
5. HIPÓTESE 28
6. METODOLOGIA 29
6.1 Delineamento 29
6.2 Área de estudo 29
6.3 Procedimento de coleta do material particulado 30
6.4 Cálculo das concentrações de MP2,5 e MP10 31
6.5 Caracterização operacional 32
6.6 Dados meteorológicos 33
6.7 Análise dos dados 34
7. DESCRIÇÃO DO(S) PRODUTO(S) FINAL(AIS) A SER(EM) DESENVOLVIDO(S) 35
8. RESULTADOS 39

8.1 Caracterização das coletas e concentrações de MP por condição operacional.....39
8.2 Distribuição das concentrações de MP2,5 e MP10 segundo o tipo de granel e ambiente de coleta.....41
8.3 Relação entre as frações MP2,5 e MP10.....43
8.4 Caracterização das condições meteorológicas das coletas.....44
8.5 Relação entre parâmetros meteorológicos e concentrações de material particulado.....46
9. DISCUSSÃO.....52
10. CONCLUSÕES.....60
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....61
12. ANEXOS.....63
12.1 PRODUTO TÉCNICO.....63

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CLI – Corredor Logística e Infraestrutura

CO – Monóxido de carbono

DPOC – Doença pulmonar obstrutiva crônica

E – Leste (*East*)

ESE – Leste-sudeste

MP – Material particulado

$MP_{2,5}$ – Material particulado com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 µm

MP_{10} – Material particulado com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm

N – Norte

NE – Nordeste

NNE – Norte-nordeste

NO – Monóxido de nitrogênio

NO_2 – Dióxido de nitrogênio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

O_3 – Ozônio

OMS – Organização Mundial da Saúde

PM – *Particulate matter* (material particulado)

$PM_{2.5}$ – *Fine particulate matter* (material particulado fino)

PM_{10} – *Inhalable particulate matter* (material particulado inalável)

QUALAR – Sistema de Informações da Qualidade do Ar

S – Sul

SE – Sudeste

SKC – Fabricante do equipamento de amostragem utilizado no estudo

SO_2 – Dióxido de enxofre

SSE – Sul-sudeste

SSW – Sul-sudoeste

SW – Sudoeste (*Southwest*)

TSH – Tubo telescópico

UR – Umidade relativa do ar

W – Oeste (*West*)

WSW – Oeste-sudoeste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos pontos de coleta na região portuária (Gate 8) e na área residencial do bairro do Macuco, em Santos, SP.

Figura 2. Distribuição das concentrações de MP2,5 por tipo de condição operacional ou ambiente de coleta.

Figura 3. Distribuição das concentrações de MP10 por tipo de condição operacional ou ambiente de coleta.

Figura 4. Correlação entre as concentrações de MP2,5 e MP10 nas amostras avaliadas.

Figura 5. Correlação entre velocidade do vento e MP10.

Figura 6. Correlação entre velocidade do vento e MP2,5.

Figura 7. Correlação entre temperatura e MP10.

Figura 8. Correlação entre temperatura e MP2,5.

Figura 9. Correlação entre umidade relativa e MP10.

Figura 10. Correlação entre umidade relativa e MP2,5.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentrações de MP2,5 e MP10 durante o embarque de açúcar.

Tabela 2. Concentrações de MP2,5 e MP10 durante o embarque de soja.

Tabela 3. Concentrações de MP2,5 e MP10 em condição sem movimentação de granel.

Tabela 4. Concentrações de MP2,5 e MP10 na área residencial.

Tabela 5. Condições meteorológicas durante as coletas na região portuária – embarque de açúcar.

Tabela 6. Condições meteorológicas durante as coletas na região portuária – embarque de soja.

Tabela 7. Condições meteorológicas durante a coleta em condição sem movimentação de granel.

Tabela 8. Condições meteorológicas durante as coletas na área residencial.

RESUMO

Introdução: Regiões portuárias apresentam múltiplas fontes de material particulado, relacionadas à movimentação de granéis sólidos, ressuspensão de poeira, tráfego rodoviário e ferroviário, equipamentos a diesel, embarcações e atividades urbanas. A interação dessas fontes com as condições meteorológicas dificulta a identificação da origem das partículas. **Objetivo:** Avaliar as concentrações de material particulado fino ($MP_{2,5}$) e inalável (MP_{10}) em diferentes condições operacionais na região do Porto de Santos e em uma área residencial próxima, considerando as variáveis meteorológicas. **Métodos:** Estudo ambiental, observacional, descritivo e exploratório, composto por 17 coletas realizadas entre janeiro e abril de 2026: 13 na região portuária, nos terminais Gate 8 CLI e Copersucar, e quatro no bairro Macuco. As campanhas abrangeram embarques de açúcar e soja, períodos sem movimentação de granéis e ambientes residenciais. Utilizou-se um amostrador dicotômico de pequeno volume, operado com vazão de 5 L/min. As concentrações foram determinadas por gravimetria, e os dados meteorológicos foram obtidos na estação CETESB Santos–Ponta da Praia. **Resultados:** As concentrações de $MP_{2,5}$ variaram de 4,2 a 297,9 µg/m³ e as de MP_{10}, de 18,3 a 341,1 µg/m³. Na região portuária, as médias foram de 108,4 µg/m³ para $MP_{2,5}$ e 185,6 µg/m³ para MP_{10}, enquanto na área residencial foram de 114,2 e 245,8 µg/m³, respectivamente. As maiores concentrações de ambas as frações ocorreram durante o embarque de açúcar, embora valores elevados também tenham sido registrados durante operações com soja, em condição sem movimentação de granel e na área residencial. Houve correlação positiva moderada entre $MP_{2,5}$ e MP_{10} ($r = 0,53$), enquanto as correlações com velocidade do vento, temperatura e umidade relativa foram fracas. **Conclusão:** As concentrações apresentaram ampla variabilidade espacial e temporal, associada à interação entre condições operacionais, fontes urbanas e regionais e fatores meteorológicos. O desenho exploratório do estudo não permite atribuir exclusivamente às atividades portuárias a origem das partículas.

Palavras-chave: material particulado; MP2,5; MP10; poluição atmosférica; atividade portuária; Porto de Santos.

ABSTRACT

Introduction: Port areas contain multiple sources of particulate matter associated with solid bulk handling, dust resuspension, road and rail traffic, diesel-powered equipment, vessels, and urban activities. The interaction between these sources and meteorological conditions makes it difficult to identify the origin of airborne particles. **Objective:** To evaluate fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and inhalable particulate matter (PM_{10}) concentrations under different operating conditions in the Port of Santos region and in a nearby residential area, considering meteorological variables. **Methods:** This environmental, observational, descriptive, and exploratory study comprised 17 sampling campaigns conducted between January and April 2026: 13 in the port area, at the Gate 8 CLI and Copersucar terminals, and four in the Macuco neighborhood. The campaigns included sugar and soybean loading operations, periods without solid bulk handling, and residential settings. A low-volume dichotomous sampler operating at a flow rate of 5 L/min was used. Concentrations were determined by gravimetric analysis, and meteorological data were obtained from the CETESB Santos–Ponta da Praia monitoring station. **Results:** $PM_{2.5}$ concentrations ranged from 4.2 to 297.9 μg/m³, whereas PM_{10} concentrations ranged from 18.3 to 341.1 μg/m³. In the port area, mean concentrations were 108.4 μg/m³ for $PM_{2.5}$ and 185.6 μg/m³ for PM_{10}, whereas in the residential area, they were 114.2 and 245.8 μg/m³, respectively. The highest concentrations of both fractions were recorded during sugar loading, although elevated values were also observed during soybean operations, under conditions without solid bulk handling, and in the residential area. A moderate positive correlation was found between $PM_{2.5}$ and PM_{10} (r = 0.53), whereas correlations with wind speed, temperature, and relative humidity were weak. **Conclusion:** Concentrations showed marked spatial and temporal variability associated with the interaction among operating conditions, urban and regional sources, and meteorological factors. The exploratory study design does not allow the origin of the particles to be attributed exclusively to port activities.

Keywords: particulate matter; PM2.5; PM10; air pollution; port activity; Port of Santos.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica constitui um importante problema ambiental e de saúde pública. Entre os poluentes de maior interesse encontra-se o material particulado, especialmente as frações MP2,5 e MP10, cuja distribuição no ambiente depende das fontes emissoras, das características das partículas e das condições meteorológicas.

Em regiões portuárias, o material particulado pode estar associado a diferentes fontes, incluindo tráfego rodoviário e ferroviário, equipamentos movidos a diesel, emissões de embarcações, atividades urbanas, ressuspensão de poeira e movimentação de cargas. A coexistência dessas fontes dificulta a atribuição da concentração observada a uma única atividade.

No Porto de Santos, a proximidade entre áreas operacionais e bairros residenciais torna relevante o monitoramento ambiental em diferentes locais e condições. A direção e a velocidade do vento, a ocorrência de chuva, a posição do amostrador e a intensidade das operações podem modificar as concentrações registradas ao longo do período de coleta.

Apesar da importância econômica e logística do complexo portuário, ainda são necessários dados locais que integrem concentrações de MP2,5 e MP10, características operacionais e variáveis meteorológicas. Esses dados podem subsidiar medidas de monitoramento, prevenção e controle ambiental.

Diante desse contexto, este estudo avaliou as concentrações de MP2,5 e MP10 em condições distintas na região portuária de Santos e em uma área residencial do bairro Macuco, considerando as condições operacionais e meteorológicas observadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A poluição atmosférica constitui um dos principais problemas ambientais contemporâneos e está relacionada a importantes impactos sobre a saúde humana, os ecossistemas e a qualidade de vida. A composição do ar em áreas urbanas e industriais é influenciada por fontes fixas e móveis, pela densidade populacional, pelo uso do solo e pelas condições meteorológicas. Entre os poluentes considerados prioritários estão o material particulado, o ozônio, os óxidos de nitrogênio, os óxidos de enxofre, o monóxido de carbono e determinados metais. A magnitude do risco associado a esses contaminantes depende da concentração, do tempo de exposição, da composição química, do tamanho das partículas e da susceptibilidade individual.[1,2]

O material particulado corresponde a uma mistura heterogênea de partículas sólidas e gotículas líquidas suspensas no ar. Sua classificação mais empregada considera o diâmetro aerodinâmico: MP10 representa partículas com diâmetro igual ou inferior a 10 μm, enquanto MP2,5 representa a fração fina, com diâmetro igual ou inferior a 2,5 μm. Essa classificação possui relevância fisiológica porque o tamanho influencia a região de deposição no sistema respiratório, a permanência na atmosfera e a capacidade de transporte a longas distâncias.[3]

As partículas maiores tendem a se depositar predominantemente nas vias aéreas superiores e de condução, enquanto partículas finas podem alcançar bronquíolos e alvéolos. A deposição não depende exclusivamente do tamanho, mas também da forma, densidade, higroscopicidade, padrão ventilatório e características anatômicas do indivíduo. Uma vez depositadas, as partículas podem desencadear irritação, alteração da depuração mucociliar, recrutamento de células inflamatórias e produção de mediadores pró-inflamatórios.[4-6]

A composição do material particulado varia conforme a fonte. Partículas originadas de processos mecânicos, como fragmentação, transferência de cargas e ressuspensão de poeira, frequentemente apresentam maior proporção da fração grossa. Em contrapartida, combustão de

diesel, emissões marítimas, processos industriais e formação secundária na atmosfera podem contribuir de maneira importante para o MP2,5. Sulfatos, nitratos, amônio, carbono elementar, carbono orgânico, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais e material biológico podem integrar a composição das partículas.[7,8]

Os mecanismos de toxicidade do MP são complexos. Estudos experimentais e epidemiológicos sustentam a participação de estresse oxidativo, inflamação pulmonar, disfunção mitocondrial, alteração da permeabilidade epitelial, ativação endotelial e desequilíbrio autonômico. Em células epiteliais respiratórias, a exposição pode estimular vias inflamatórias, formação de espécies reativas de oxigênio, ativação do inflamassoma e alterações em processos de morte e remodelamento celular.[9-12]

No sistema respiratório, a exposição ao material particulado tem sido associada a exacerbação da asma e da DPOC, aumento de sintomas respiratórios, redução da função pulmonar e maior ocorrência de atendimentos e hospitalizações. Crianças, idosos, pessoas com doenças respiratórias ou cardiovasculares preexistentes e indivíduos ocupacionalmente expostos constituem grupos particularmente vulneráveis.[13-16]

Os efeitos do MP não se restringem ao pulmão. Partículas ultrafinas e mediadores produzidos no tecido pulmonar podem contribuir para respostas sistêmicas, incluindo disfunção vascular, alterações da coagulação, inflamação sistêmica e agravamento de doenças cardiovasculares. A literatura também discute associações com desfechos metabólicos, neurológicos e renais, embora a magnitude e os mecanismos variem conforme a população e o perfil de exposição.[17,18]

Regiões portuárias apresentam uma combinação singular de fontes. Emissões provenientes de navios, caminhões, locomotivas, empilhadeiras, geradores, equipamentos de carga e descarga, armazenamento e movimentação de granéis coexistem com fontes urbanas e

industriais. A proximidade entre terminais e bairros residenciais pode ampliar a preocupação com a exposição da comunidade, sobretudo em cidades portuárias densamente ocupadas.[19]

O transporte marítimo contribui para emissões de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, material particulado e gases de efeito estufa. Mesmo com avanços regulatórios e tecnológicos, as emissões permanecem relevantes em áreas de intenso tráfego marítimo. Além das emissões de combustão, operações com granéis sólidos podem produzir poeira pela queda do material, movimentação em correias transportadoras, transferência entre equipamentos, carregamento de porões e ressuspensão do material depositado em superfícies.[20,21]

O Porto de Santos possui elevada relevância econômica e logística, conectando cadeias de exportação e importação e movimentando grandes volumes de granéis sólidos, líquidos, contêineres e cargas gerais. Sua área operacional se estende pelas margens de Santos e Guarujá e mantém forte integração logística com Cubatão. A atividade portuária também influencia o tráfego rodoviário e ferroviário, o uso de equipamentos pesados e a ocupação do território.[22-24]

A Baixada Santista apresenta características geográficas que tornam a dispersão atmosférica particularmente complexa. A presença do oceano favorece circulações de brisa marítima e terrestre, enquanto a Serra do Mar atua como barreira orográfica e pode canalizar, desviar ou restringir o escoamento. A direção do vento determina o transporte entre áreas portuárias, industriais e residenciais; a velocidade influencia a diluição; a estabilidade atmosférica limita a mistura vertical; e a precipitação pode remover partículas por deposição úmida.[25-27]

A temperatura e a radiação solar também participam da dinâmica dos poluentes. O aquecimento da superfície favorece a convecção e a expansão da camada de mistura, podendo reduzir concentrações próximas ao solo. Por outro lado, a radiação solar intensifica reações

fotoquímicas relacionadas ao ozônio. A umidade relativa modifica o tamanho e a massa de partículas higroscópicas e pode favorecer processos de formação secundária.[28]

No município de Santos, bairros residenciais encontram-se próximos à zona portuária. O Macuco, localizado entre o porto e áreas urbanas consolidadas, apresenta ocupação residencial e comercial e forte vínculo histórico com as atividades portuárias. Essa proximidade torna relevante avaliar não apenas concentrações junto às operações, mas também a presença de partículas em áreas habitadas.

A avaliação ambiental próxima à fonte apresenta vantagens e limitações. Coletas em curta distância dos *shiploaders* podem identificar condições de exposição local durante operações específicas, mas os resultados são influenciados por variações instantâneas do processo, vento, altura do ponto de coleta, distância da emissão, movimentação de veículos e outras fontes.

Apesar da importância do Porto de Santos, ainda são necessários estudos que combinem amostragem próxima às operações, caracterização do tipo de carga, registro meteorológico e comparação com áreas residenciais. A identificação dessa variabilidade pode subsidiar estratégias de monitoramento, controle de emissões e proteção de trabalhadores e comunidades.

Diante desse contexto, o presente estudo avaliou concentrações de MP2,5 e MP10 durante operações de embarque de açúcar e soja, períodos com ausência ou redução de atividade e coletas em área residencial. Também foram consideradas direção e velocidade do vento, temperatura, umidade relativa e ocorrência de chuva.

A literatura específica sobre áreas portuárias demonstra que a qualidade do ar nesses territórios resulta de uma combinação de fontes marítimas, terrestres e operacionais. Navios em manobra, atracados ou em trânsito emitem partículas e gases por meio da combustão de combustíveis marítimos; simultaneamente, caminhões, locomotivas, equipamentos de movimentação, obras, armazenamento e transferência de granéis contribuem para emissões

primárias e para a ressuspensão de poeira. Em revisão dedicada a navios e portos, Mueller et al. destacaram que motores marítimos podem permanecer em uso por períodos mais longos que motores rodoviários e que a composição do combustível e a tecnologia dos equipamentos influenciam o perfil de emissão. Os autores também ressaltaram a presença de partículas ultrafinas, carbono, sulfatos e metais como vanádio e níquel em plumas de embarcações.[33]

A revisão de Sorte et al., baseada em estudos de diferentes regiões do mundo, mostrou que ainda existe escassez de dados de monitoramento em portos, com forte concentração das publicações na Europa. A contribuição média atribuída às emissões de navios para a massa de material particulado foi geralmente estimada entre 5% e 15%, podendo ser maior em determinados portos asiáticos. O estudo também reforçou que a proximidade entre instalações portuárias e áreas densamente povoadas amplia a relevância da exposição ambiental e que padrões costeiros, como brisas marítimas e terrestres, condicionam o transporte, a transformação e o acúmulo dos poluentes.[34]

As atividades portuárias não afetam apenas a fração fina originada da combustão. Em Tarragona, Alastuey et al. realizaram caracterização química de amostras de MP10 e identificaram fontes relacionadas ao solo, tráfego, aerossóis secundários, spray marinho e ressuspensão de materiais movimentados no porto. A contribuição antropogênica estimada para o MP10 foi de 62%, com 34% atribuídos ao tráfego. O trabalho demonstrou que o vento e a circulação de veículos podem ressuspender materiais soltos, tornando a poeira fugitiva uma fonte relevante mesmo fora do momento imediato de carregamento ou descarregamento.[35]

Em Barcelona, Pérez et al. combinaram amostragem simultânea no porto e em área urbana com especiação química e modelagem por fatoração de matriz positiva. Aproximadamente 50% a 55% do MP10 e do MP2,5 medidos no porto foram atribuídos a atividades portuárias, enquanto a contribuição estimada para o fundo urbano alcançou 9% a 12% para MP10 e 11%

a 15% para MP2,5. O impacto envolveu emissões primárias de combustão de óleo combustível, tráfego e poeira mineral, além da formação de aerossóis secundários durante o transporte das massas de ar para a cidade.[36]

Os resultados de Barcelona são particularmente importantes para cidades costeiras porque evidenciam que a concentração urbana pode refletir não apenas partículas emitidas diretamente no porto, mas também transformações atmosféricas. Precursores gasosos, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, amônia e compostos orgânicos voláteis, podem participar da formação de sulfatos, nitratos e aerossóis orgânicos secundários. Dessa forma, a distância entre a fonte e o ponto receptor não implica necessariamente redução simples e linear da contribuição portuária.[36]

A distribuição espacial da poluição em comunidades vizinhas aos portos também depende fortemente do tráfego terrestre. No entorno do Porto de Oakland, Fujita et al. observaram maiores concentrações de poluentes diretamente emitidos ao longo de vias com tráfego intenso, com gradientes mais acentuados para óxido nítrico e carbono negro, marcadores associados a veículos pesados a diesel. O estudo mostrou que redes convencionais de monitoramento podem não representar adequadamente pontos de pequena escala e reforçou a utilidade de múltiplos pontos fixos e monitoramento móvel.[37]

Além da variação horizontal, a concentração de partículas pode mudar com a altura. Em um porto de granéis secos na China, Shen et al. utilizaram veículo aéreo não tripulado para medir partículas entre o solo e 120 m. Os autores encontraram diferenças importantes entre locais e alturas e demonstraram que tipo e granulometria da carga, canhões de névoa e barreiras porosas modificaram a distribuição vertical, principalmente das partículas suspensas totais. O estudo alerta que medições exclusivamente ao nível do solo podem não caracterizar integralmente a dispersão nas proximidades das operações.[38]

O acompanhamento temporal também pode contribuir para a gestão da qualidade do ar. No Porto de Gijón, Sánchez Lasheras et al. analisaram séries históricas de MP10 e poluentes gasosos e compararam modelos estatísticos e de aprendizado de máquina para previsão de concentrações futuras. Embora esse tipo de modelagem exija séries longas e contínuas, o estudo demonstra o potencial da integração entre monitoramento de material particulado, gases e variáveis temporais para antecipar episódios críticos e orientar medidas preventivas.[39]

A importância sanitária das emissões portuárias foi demonstrada em estudo realizado em Ancona, cidade italiana cujo porto está inserido no tecido urbano. Mei et al. estimaram concentrações anuais maiores de MP2,5 e dióxido de nitrogênio na área próxima ao porto e observaram associações positivas com mortalidade. Entre moradores da área portuária, foram encontrados excessos de risco para mortalidade natural, cardiovascular e respiratória. Esses resultados não podem ser diretamente extrapolados para Santos, mas sustentam a necessidade de investigar a exposição de comunidades que vivem próximas a instalações portuárias.[40]

3. JUSTIFICATIVA

A elevada movimentação de cargas do Porto de Santos, a presença de operações com granéis sólidos e a proximidade física entre terminais e áreas residenciais justificam a investigação das concentrações de material particulado no ambiente. A avaliação de MP2,5 e MP10 em condições operacionais distintas permite reconhecer padrões, identificar episódios de maior concentração e compreender o papel das variáveis meteorológicas. Do ponto de vista da saúde ambiental, a detecção de partículas em áreas residenciais próximas é relevante porque indica potencial exposição de indivíduos que não participam diretamente das atividades portuárias. O estudo também se justifica pela necessidade de dados locais, uma vez que a

composição das fontes, a dinâmica de ventos e a configuração territorial de Santos diferem de outras cidades portuárias.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das atividades de movimentação e embarque de granéis sólidos sobre as concentrações de MP2,5 e MP10 na região do Porto de Santos.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar as concentrações de MP2,5 e MP10 nas amostras coletadas na região portuária e no bairro Macuco.
- Caracterizar direção e velocidade do vento, temperatura e umidade relativa durante as coletas.

5. HIPÓTESE

As concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} apresentam variação entre os diferentes locais, períodos de coleta e condições operacionais avaliadas no Porto de Santos e no bairro Macuco, sendo influenciadas pela interação entre atividades portuárias, fontes urbanas e condições meteorológicas.

Espera-se que as concentrações de material particulado sejam maiores em determinados períodos de movimentação de granéis sólidos e em condições meteorológicas menos favoráveis à dispersão, como baixa velocidade do vento e ausência de precipitação. Entretanto, considera-se que os valores observados não possam ser atribuídos exclusivamente às atividades portuárias, em razão da presença simultânea de outras fontes ambientais e urbanas.

6. METODOLOGIA

6.1 Delineamento

Trata-se de um estudo ambiental, observacional, descritivo e exploratório, desenvolvido por meio de amostragem de material particulado em condições reais de operação portuária. A investigação foi conduzida entre janeiro e abril de 2026 e comparou uma área de influência direta do porto com uma área residencial do entorno, buscando descrever as concentrações de MP2,5 e MP10 e sua relação com as condições meteorológicas e operacionais observadas em cada coleta.

6.2 Área de estudo

As coletas foram realizadas em dois cenários. O primeiro correspondeu à região portuária de Santos, com amostragens no Gate 8 da CLI e em área operacional da Copersucar, durante operações de embarque de granéis sólidos, especialmente açúcar e soja. Nessa condição, o amostrador foi posicionado próximo à fonte emissora, a distâncias aproximadas de 5 a 30 m do navio e/ou do sistema de *shiploader*, de acordo com a condição operacional do dia. O segundo cenário correspondeu ao bairro do Macuco, utilizado como área residencial de comparação, localizado aproximadamente 2,4 km ao sul do Gate 8 e a cerca de 624 m do ponto portuário mais próximo. Na área residencial foram realizadas coletas em ambiente externo e interno, de modo a descrever a presença de material particulado no entorno habitado. Para a caracterização meteorológica, utilizou-se como referência a estação Santos–Ponta da Praia, da CETESB, situada na mesma região costeira de influência das coletas. A Figura 1 apresenta a localização geral dos pontos de coleta na região portuária e na área residencial avaliada.



Figura 1. Localização dos pontos de coleta na região portuária (Gate 8) e na área residencial do bairro do Macuco, em Santos, SP. *Fonte: elaborado pelo autor com base em Google Maps (2026).*

6.3 Procedimento de coleta do material particulado

As coletas das frações MP2,5 e MP10 foram realizadas com bomba de amostragem da marca SKC, acoplada a um sistema dicotômico de pequeno volume. O conjunto de amostragem foi operado com vazão nominal constante de 5 L/min. Antes do início de cada campanha, foram registrados o local, a data, o horário de início, a condição operacional, o tipo de carga movimentada e a posição do equipamento em relação à fonte potencial de emissão. Ao término, foram anotados o horário final, o tempo efetivo de coleta e eventuais intercorrências, como paralisação de *shiploaders* ou precipitação.

Na região portuária, o equipamento foi instalado no Gate 8, em áreas operacionais da CLI e da Copersucar, a aproximadamente 5 a 30 m do navio e dos sistemas de carregamento, conforme a configuração de cada operação. As campanhas abrangeram embarque de açúcar, embarque de soja, situação de manutenção sem navio atracado, períodos sem atividade e operações interrompidas por chuva. No bairro do Macuco, as coletas foram realizadas em uma

residência localizada a aproximadamente 2,4 km ao sul do Gate 8, incluindo uma coleta em ambiente interno, na sala do imóvel, e coletas em ambiente externo. O tempo de amostragem variou entre 5 h 32 min e 8 h 02 min, de acordo com as condições de campo.

Os filtros foram previamente identificados e pesados antes da exposição. Durante a coleta, o ar ambiente foi aspirado pelo sistema, e o material particulado foi retido nos filtros correspondentes às diferentes frações granulométricas. Após a amostragem, os filtros foram novamente pesados, e a massa de partículas coletada foi determinada pela diferença entre a massa final e a massa inicial. As campanhas interrompidas por chuva tiveram o tempo efetivo considerado no cálculo do volume amostrado, evitando que o período sem operação fosse incorporado indevidamente à concentração calculada.

6.4 Cálculo das concentrações de MP2,5 e MP10

O volume de ar amostrado foi obtido a partir da vazão da bomba e do tempo efetivo de coleta, conforme a Equação 1:

$$\mathbf{V = (Q \times t) / 1.000}$$

em que V corresponde ao volume de ar amostrado, em metros cúbicos (m^3); Q representa a vazão de amostragem, em litros por minuto (L/min); e t corresponde ao tempo efetivo de coleta, em minutos. A divisão por 1.000 converte o volume de litros para metros cúbicos. Com vazão de 5 L/min, os volumes amostrados variaram de 1,660 a 2,410 m^3.

A massa de material particulado retida em cada filtro foi calculada pela Equação 2:

$$\mathbf{\Delta m = mf - mi}$$

em que Δm representa a massa de material particulado coletada; mf, a massa final do filtro após a coleta; e mi, a massa inicial do filtro antes da coleta.

A concentração de cada fração foi determinada pela razão entre a massa coletada e o volume de ar amostrado, conforme a Equação 3:

$$\mathbf{C = (\Delta m \times 10^6) / V}$$

em que C corresponde à concentração em microgramas por metro cúbico (μg/m³); Δm é a massa coletada em gramas; 10^6 é o fator de conversão de gramas para microgramas; e V é o volume amostrado em metros cúbicos.

A concentração de MP10 total foi calculada pela soma da concentração da fração fina com a concentração da fração grossa, conforme a Equação 4:

$$\mathbf{MP10 = MP2{,}5 + MPcoarse}$$

Os valores finais foram apresentados em μg/m³, mantendo-se a mesma unidade empregada nas tabelas de resultados e nos documentos de referência do estudo.

6.5 Caracterização operacional

Em cada campanha de amostragem foram registrados local, data, tempo efetivo de coleta, tipo de carga movimentada, condição operacional e observações de campo. Na região portuária, as campanhas incluíram situações de embarque de açúcar, embarque de soja, manutenção de equipamentos, ausência de navio atracado e interrupções por chuva. Também foram anotadas informações sobre o funcionamento de *shiploaders*, tubo telescópico e outras condições capazes de interferir na emissão e dispersão do material particulado. Na área residencial, foram descritas as condições do ambiente de coleta e o contexto do entorno imediato. O *shiploader* é um equipamento instalado no cais, junto ao costado da embarcação, utilizado para transferir granéis sólidos, conduzidos por correias transportadoras, diretamente para os porões de navios graneleiros. Esse equipamento permite o carregamento contínuo de

produtos como soja, milho, açúcar e farelo. No terminal avaliado, apresenta capacidade de carregamento de até 2.500 t/h, sendo a carga direcionada ao porão por meio de um tubo telescópico, que reduz a altura de queda do material e contribui para diminuir a dispersão de partículas durante a operação (Portos e Aeroportos, 2025; CLI Sul, 2024).

6.6 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos no sistema QUALAR, mantido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), utilizando-se os registros da estação automática Santos–Ponta da Praia, localizada na Praça Engenheiro José Rebouças, em Santos. A estação encontra-se aproximadamente 4,2 km a sudeste do ponto de amostragem situado no Gate 8 do Porto de Santos, localizado nas coordenadas 23°56′57,8″ S e 46°19′18,3″ O.

Foram selecionados os registros correspondentes às datas e aos horários das coletas de material particulado. Para cada período de amostragem, foram obtidas a temperatura do ar (°C), a umidade relativa do ar (%), a velocidade do vento (m/s) e a direção do vento (graus). A temperatura, a umidade relativa e a velocidade do vento foram representadas pela média dos registros disponíveis durante o intervalo de cada coleta.

A direção do vento foi interpretada como o setor geográfico de origem do fluxo atmosférico, conforme a convenção meteorológica. Os registros foram agrupados nos setores norte (N), nordeste (NE), leste (L), sudeste (SE), sul (S), sudoeste (SO), oeste (O) e noroeste (NO). Quando apresentados pelo sistema no padrão internacional, os códigos E, SW, W e NW foram convertidos, respectivamente, em L, SO, O e NO.

A direção predominante foi determinada considerando-se os registros correspondentes ao período de cada coleta e sua natureza circular. Essa variável foi analisada em conjunto com a localização do Gate 8 e das potenciais fontes portuárias, com a finalidade de verificar se o

ponto de amostragem se encontrava a sotavento das áreas de movimentação de granéis. Temperatura, umidade e velocidade do vento foram utilizadas para contextualizar as condições de ressuspensão, transporte, dispersão e remoção atmosférica do $MP_{2,5}$ e do MP_{10}.

Devido à distância de aproximadamente 4,2 km entre a estação meteorológica e o Gate 8, os registros da CETESB foram considerados representativos das condições meteorológicas gerais da região, reconhecendo-se a possibilidade de variações locais relacionadas à configuração portuária, às edificações e à circulação de brisas costeiras.

6.7 Análise dos dados

Os resultados foram organizados em tabelas consolidadas contendo informações de área, local, data, condição operacional, volume de ar amostrado, parâmetros meteorológicos e concentrações de MP2,5 e MP10.

A análise estatística foi realizada no software GraphPad Prism (Versão 10), por meio de estatística descritiva, incluindo média, mediana, desvio-padrão, valores mínimos e máximos. As distribuições de MP2,5 e MP10 foram apresentadas em boxplots, permitindo comparar a variabilidade entre as condições avaliadas.

De forma complementar, foram realizadas análises exploratórias de correlação de Pearson entre MP2,5 e MP10, bem como entre as concentrações de material particulado e os parâmetros meteorológicos, incluindo velocidade do vento, temperatura e umidade relativa. Os gráficos foram gerados no GraphPad Prism.

7. DESCRIÇÃO DO(S) PRODUTO(S) FINAL(AIS) A SER(EM) DESENVOLVIDO(S)

Produto: Relatório técnico executivo intitulado **"Monitoramento de material particulado em áreas portuárias de granéis sólidos no Porto de Santos"**, elaborado a partir dos resultados da dissertação de mestrado. O documento apresenta, de forma objetiva, os dados de concentração de $MP_{2,5}$ e MP_{10}, a metodologia empregada, as limitações do estudo e recomendações para aprimoramento do monitoramento e das medidas de controle ambiental nos terminais portuários.

Relevância/Utilidade:

O produto possui relevância por transformar os resultados acadêmicos da dissertação em informações técnicas acessíveis e úteis para gestores, administradores, responsáveis ambientais e profissionais de saúde e segurança dos terminais portuários. Sua utilidade está relacionada ao apoio à tomada de decisão, ao planejamento de ações de monitoramento, à identificação de pontos que necessitam de maior atenção e ao fortalecimento das práticas de prevenção e controle da emissão e dispersão de material particulado.

Aderência (critério obrigatório): O produto apresenta aderência direta à linha de pesquisa do Programa de Mestrado Profissional em Saúde e Meio Ambiente, por integrar avaliação ambiental, exposição a poluentes atmosféricos, possíveis repercussões para a saúde e proposição de medidas aplicáveis ao contexto estudado.

Impacto: O impacto esperado está relacionado à possibilidade do relatório subsidiar ações de gestão ambiental, saúde ocupacional e prevenção de riscos nos terminais que movimentam granéis sólidos. O documento pode contribuir para o aperfeiçoamento de protocolos de monitoramento, para a revisão de procedimentos operacionais, para a adoção de medidas de controle de poeira e para a integração entre os setores de meio ambiente, operação, manutenção

e saúde e segurança do trabalho. O impacto também pode alcançar trabalhadores e comunidades do entorno, caso as recomendações contribuam para a redução da exposição ambiental ao material particulado.

Demanda: O produto responde à necessidade de disponibilizar informações locais e sistematizadas sobre a presença e a variabilidade do material particulado em áreas relacionadas às atividades portuárias. A demanda decorre da intensa movimentação de granéis sólidos no Porto de Santos, da proximidade entre áreas operacionais e bairros residenciais e da necessidade de instrumentos técnicos que auxiliem os terminais na avaliação e no aperfeiçoamento de suas práticas ambientais.

Trata-se de uma demanda identificada no próprio campo de estudo, especialmente entre os setores responsáveis pela gestão ambiental e pela saúde e segurança das operações portuárias.

Área impactada pela produção: A principal área impactada é a de **gestão ambiental portuária**, com interface direta com:

- saúde ambiental;
- saúde do trabalhador;
- gestão de riscos;
- controle de emissões atmosféricas;
- sustentabilidade;

Aplicabilidade: O relatório apresenta aplicabilidade imediata, pois pode ser encaminhado aos administradores dos terminais portuários e utilizado como instrumento de apoio para:

- planejamento de campanhas de monitoramento de $MP_{2,5}$ e MP_{10};
- definição de pontos prioritários de coleta;

- registro conjunto de dados operacionais e meteorológicos;
- avaliação de medidas de controle de poeira;
- acompanhamento de operações com granéis sólidos;

Sua aplicação não depende de tecnologias complexas, podendo ser incorporada às rotinas já existentes de gestão ambiental e de saúde e segurança do trabalho.

Abrangência potencial: A abrangência inicial compreende os terminais que movimentam granéis sólidos no Porto de Santos. Entretanto, o produto possui potencial para ser utilizado por:

- outros terminais do complexo portuário;
- operadores portuários;
- autoridades portuárias;
- órgãos ambientais;
- secretarias municipais;
- serviços de saúde do trabalhador;
- portos localizados em outras regiões do país.

Sua abrangência pode ser ampliada por meio da adaptação do conteúdo às características operacionais e ambientais de cada terminal.

Replicabilidade: O produto é replicável, pois sua estrutura pode ser aplicada em outros terminais portuários, áreas industriais, centros logísticos e locais de movimentação de materiais particulados. O modelo também pode ser reaplicado periodicamente para acompanhamento temporal e avaliação da efetividade das medidas implantadas.

Inovação: O caráter inovador do produto está na conversão dos resultados de uma pesquisa ambiental realizada em condições reais de operação portuária em um instrumento técnico conciso, direcionado aos tomadores de decisão.

A inovação é predominantemente incremental e organizacional, pois aprimora a forma de comunicar, sistematizar e utilizar informações ambientais já existentes, aproximando a produção acadêmica da gestão portuária.

Complexidade: O produto apresenta complexidade média, pois sua elaboração exigiu a integração de diferentes etapas e áreas do conhecimento

Apesar de possuir linguagem acessível, o relatório foi construído a partir de dados ambientais, cálculos específicos e interpretação multidisciplinar envolvendo saúde, meio ambiente e atividade portuária.

8. RESULTADOS

8.1 Caracterização das coletas e concentrações de MP por condição operacional

Foram avaliadas 17 coletas realizadas entre janeiro e abril de 2026, incluindo amostras obtidas na região portuária durante embarque de açúcar, embarque de soja, condição sem movimentação de granel e amostras da área residencial do Macuco. As Tabelas 1 a 4 apresentam os valores de volume amostrado e as concentrações de MP2,5 e MP10 para cada condição. O resultado de MP10 da coleta de 24/03/2026 não estava disponível e foi mantido como ausência de dado.

Durante o embarque de açúcar, observou-se ampla variação nas concentrações de material particulado. O maior valor de MP2,5 foi registrado em 07/01/2026, durante o embarque de açúcar, atingindo 297,9 µg/m³. Nessa mesma coleta, o MP10 também apresentou o maior valor do grupo, com 341,1 µg/m³. Em contraste, nas coletas com interrupção por chuva ou em condição operacional menos intensa, os valores de MP2,5 foram menores, embora o MP10 tenha permanecido elevado em algumas situações, como em 16/01/2026 e 26/01/2026.

Tabela 1. Concentrações de MP2,5 e MP10 durante o embarque de açúcar.

Área	Local	Data	Tempo	Condição operacional	Volume (m³)	MP2,5 (µg/m³)	MP10 (µg/m³)
Região portuária	Gate 8 CLI	07/01/2026	7h01	Embarque de açúcar	2,105	297,9	341,1
Região portuária	Gate 8 CLI	14/01/2026	6h01	Embarque de açúcar interrompido por chuva	1,805	9,4	18,3
Região portuária	Gate 8 CLI	16/01/2026	5h32	Embarque de açúcar interrompido por chuva	1,660	10,6	253,1
Região portuária	Copersucar	26/01/2026	8h00	Embarque de açúcar	2,400	4,2	212,1
Região portuária	Copersucar	30/01/2026	8h00	Embarque de açúcar	2,400	19,2	25,8

Nas coletas associadas ao embarque de soja, as concentrações de MP2,5 foram mais consistentemente elevadas em comparação ao grupo açúcar. Os maiores valores foram observados em 26/03/2026 e 27/03/2026, com MP2,5 de 235,0 e 237,5 µg/m³, respectivamente.

O MP10 também apresentou valores elevados nesses dias, especialmente em 26/03/2026, quando atingiu 285,4 µg/m³. A coleta de 13/04/2026 apresentou os menores valores do grupo, com 33,3 µg/m³ de MP2,5 e 35,4 µg/m³ de MP10.

Tabela 2. Concentrações de MP2,5 e MP10 durante o embarque de soja.

Área	Local	Data	Tempo	Condição operacional	Volume (m³)	MP2,5 (µg/m³)	MP10 (µg/m³)
Região portuária	Gate 8 CLI	28/01/2026	8h02	Embarque de soja	2,410	179,2	241,5
Região portuária	Gate 8 CLI	13/03/2026	6h32	Embarque de soja; período após frente fria	1,960	117,5	138,3
Região portuária	Gate 8 CLI	24/03/2026	8h00	Embarque de soja	2,400	54,6	—
Região portuária	Gate 8 CLI	26/03/2026	8h00	Embarque de soja	2,400	235,0	285,4
Região portuária	Gate 8 CLI	27/03/2026	8h00	Embarque de soja	2,400	237,5	240,4
Região portuária	Copersucar	01/04/2026	7h19	Embarque de soja; interrupção por chuva	2,195	205,0	205,8
Região portuária	Gate 8 CLI	13/04/2026	8h00	Embarque de soja	2,400	33,3	35,4

A condição sem movimentação de granel foi representada por uma única coleta, realizada durante manutenção do sistema e sem navio atracado. Nessa situação, o MP2,5 foi baixo, com 5,4 µg/m³, enquanto o MP10 foi de 230,0 µg/m³. Esse achado indica que, mesmo na ausência de operação direta de embarque, a fração inalável pode permanecer elevada, possivelmente refletindo ressuspensão local, atividades adjacentes ou influência ambiental do entorno.

Tabela 3. Concentrações de MP2,5 e MP10 em condição sem movimentação de granel.

Área	Local	Data	Tempo	Condição operacional	Volume (m³)	MP2,5 (µg/m³)	MP10 (µg/m³)
Região portuária	Gate 8 CLI	09/01/2026	8h00	Sistema em manutenção	2,400	5,4	230,0

Na área residencial, as concentrações de MP10 permaneceram relativamente elevadas em todas as coletas, variando de 195,4 a 305,4 µg/m³. O MP2,5 apresentou maior variação, com valores entre 12,5 e 190,8 µg/m³. As coletas na área residencial apresentaram comportamento

variável, sugerindo influência de condições ambientais locais e possível contribuição de fontes externas.

Tabela 4. Concentrações de MP2,5 e MP10 na área residencial.

Área	Local	Data	Tempo	Condição operacional	Volume (m^3)	MP2,5 ($\mu g/m^3$)	MP10 ($\mu g/m^3$)
Área residencial	Macuco	12/01/2026	8h01	Ambiente externo	2,405	165,1	254,9
Área residencial	Macuco	13/01/2026	8h00	Ambiente externo	2,400	88,3	305,4
Área residencial	Macuco	15/01/2026	8h00	Ambiente externo	2,400	12,5	227,5
Área residencial	Macuco	17/01/2026	8h00	Ambiente externo	2,400	190,8	195,4

8.2 Distribuição das concentrações de MP2,5 e MP10 segundo o tipo de granel e ambiente de coleta

A distribuição das concentrações por grupo foi avaliada por boxplots, permitindo observar a mediana, a dispersão dos valores e a presença de pontos extremos. A Figura 2 mostra que as maiores concentrações de MP2,5 tenderam a ocorrer durante o embarque de soja e em algumas coletas da área residencial. No grupo açúcar, a mediana foi baixa, mas houve um valor elevado em 07/01/2026, indicando comportamento pontual e não uniforme. A condição sem movimentação apresentou valor baixo de MP2,5, embora represente apenas uma coleta.

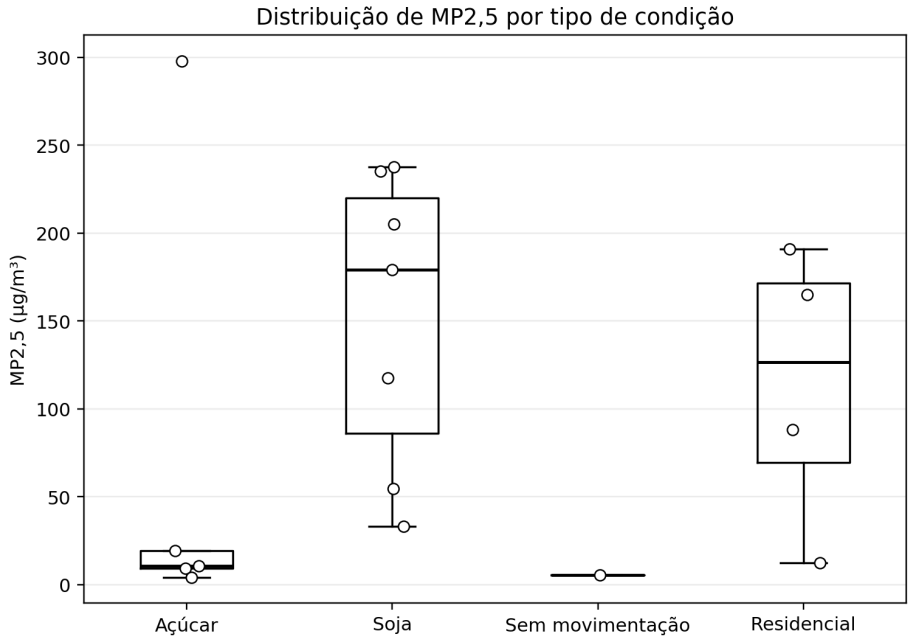


Figura 2. Distribuição das concentrações de MP2,5 por tipo de condição operacional ou ambiente de coleta. Os pontos representam as coletas individuais e o boxplot indica a distribuição dos valores em cada grupo.

A Figura 3 evidencia que o MP10 apresentou valores elevados em diferentes condições, inclusive na área residencial e na condição sem movimentação. O grupo açúcar apresentou grande variabilidade, com valores muito baixos em algumas coletas e valores elevados em outras. No grupo soja, as concentrações de MP10 foram relativamente altas em várias coletas, sugerindo contribuição importante da movimentação de granel sólido para a fração inalável.

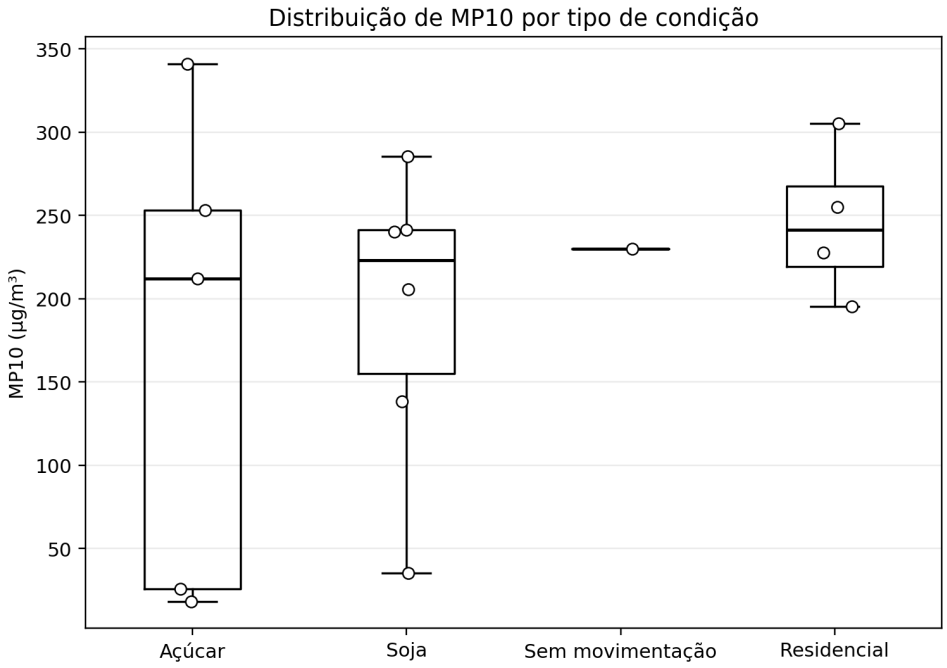


Figura 3. Distribuição das concentrações de MP10 por tipo de condição operacional ou ambiente de coleta. O valor ausente de MP10 em 24/03/2026 foi excluído apenas desta análise gráfica.

8.3 Relação entre as frações MP2,5 e MP10

Após a comparação entre os grupos, foi avaliada a associação entre as frações fina e inalável do material particulado. Essa análise permite verificar se os aumentos de MP2,5 ocorreram acompanhados por aumentos de MP10, ou se as frações apresentaram comportamento distinto entre as coletas. A Figura 4 mostrou correlação positiva moderada e exploratória entre MP2,5 e MP10 ($r = 0.53$; $n = 16$), indicando que, em parte das coletas, o aumento da fração fina acompanhou o aumento da fração inalável. Entretanto, a dispersão dos pontos demonstra que essa relação não foi uniforme, pois algumas amostras apresentaram MP10 elevado com MP2,5 relativamente baixo. Esse comportamento sugere que as frações podem refletir contribuições diferentes, associadas tanto à movimentação de granel quanto à ressuspensão de partículas mais grossas.

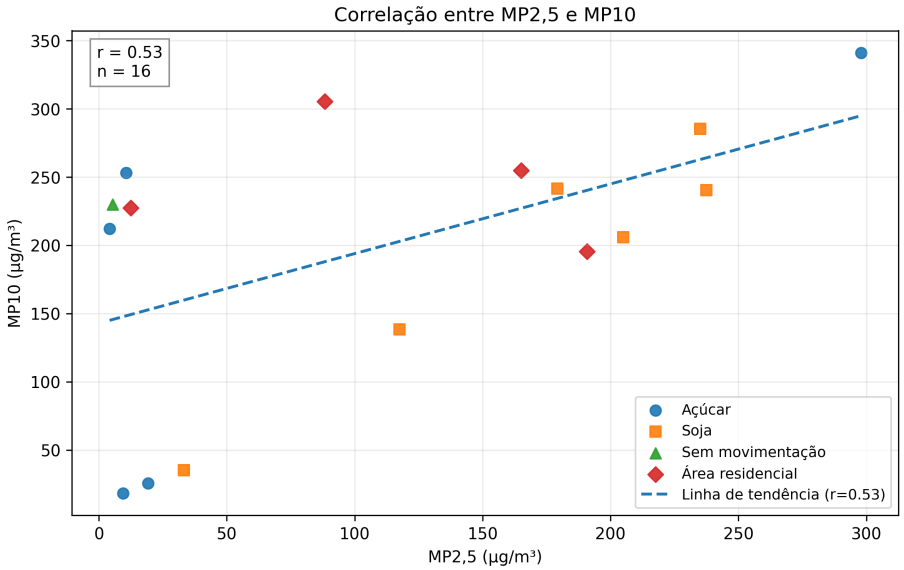


Figura 4. Correlação entre as concentrações de MP2,5 e MP10 nas amostras avaliadas. Cada ponto representa uma coleta e a linha tracejada indica a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.53; n = 16.

8.4 Caracterização das condições meteorológicas das coletas

A tabela 5 demonstra as condições meteorológicas durante as coletas associadas ao embarque de açúcar, a velocidade média do vento variou de 0,9 a 1,6 m/s, com direções predominantes de sudeste (SE), sul-sudeste (SSE), leste (E), leste-sudeste (ESE) e norte-nordeste (NNE). A temperatura variou de 28,6 °C a 32,6 °C e a umidade relativa de 50,9% a 64,3%. As coletas interrompidas por chuva ocorreram em 14/01/2026 e 16/01/2026, o que deve ser considerado na interpretação das concentrações de material particulado, especialmente pela possibilidade de redução da ressuspensão e da dispersão local.

Tabela 5. Condições meteorológicas durante as coletas na região portuária – embarque de açúcar. Sudeste (SE), sul-sudeste (SSE), leste (E), leste-sudeste (ESE) e norte-nordeste (NNE).

Local	Data	Tempo	Condição operacional	Direção	Vel. (m/s)	Temp. (°C)	UR (%)
Gate 8 CLI	07/01/2026	7h01	Embarque de açúcar	SE/SSE	1,6	30,3	59,1
Gate 8 CLI	14/01/2026	6h01	Embarque de açúcar interrompido por chuva	SE/SSE	1,5	32,6	50,9
Gate 8 CLI	16/01/2026	5h32	Embarque de açúcar interrompido por chuva	E/ESE	0,9	30,4	62,4
Copersucar	26/01/2026	8h00	Embarque de açúcar	NNE/SSE	1,4	29,2	64,3
Copersucar	30/01/2026	8h00	Embarque de açúcar	NNE/SSE	1,1	28,6	62,4

Nas coletas com embarque de soja, a velocidade do vento permaneceu entre 0,8 e 1,3 m/s, com temperatura variando de 27,8 °C a 30,7 °C e umidade relativa entre 62,6% e 71,2%. A maior umidade relativa foi observada em 13/03/2026, após frente fria, enquanto a coleta de 01/04/2026 apresentou interrupção por chuva (Tabela 6). Esses registros indicam que as campanhas de soja ocorreram sob condições meteorológicas moderadas, mas com eventos pontuais capazes de modificar a emissão, deposição ou dispersão das partículas.

Tabela 6. Condições meteorológicas durante as coletas na região portuária – embarque de soja. Norte-nordeste (NNE); nordeste (NE); sudeste (SE); sul-sudeste (SSE); sul-sudoeste (SSW); sudoeste (SW); e oeste-sudoeste (WSW).

Local	Data	Tempo	Condição operacional	Direção	Vel. (m/s)	Temp. (°C)	UR (%)
Gate 8 CLI	28/01/2026	8h02	Embarque de soja no Shiploader 1	NNE/SSE	1,3	30,7	65,6
Gate 8 CLI	13/03/2026	6h32	Embarque de soja; período após frente fria	SW/SSW	0,8	27,9	71,2
Gate 8 CLI	24/03/2026	8h00	Embarque de soja	SSE/SSW	1,0	29,0	62,6
Gate 8 CLI	26/03/2026	8h00	Embarque de soja	SE/SSE	1,0	29,9	65,7
Gate 8 CLI	27/03/2026	8h00	Embarque de soja	NE/SSE	1,1	30,1	67,1
Copersucar	01/04/2026	7h19	Embarque de soja; interrupção por chuva	NNE/SE	1,2	28,4	63,9
Gate 8 CLI	13/04/2026	8h00	Embarque de soja	WSW/SE	1,2	27,8	65,8

A coleta realizada sem movimentação de granel ocorreu durante manutenção do sistema e ausência de navio atracado, com vento predominante de oeste-sudoeste (WSW) e sul (S), velocidade de 1,4 m/s, temperatura de 31,2 °C e umidade relativa de 64,0%.

Tabela 7. Condições meteorológicas durante a coleta em condição sem movimentação de granel. Oeste-sudoeste (WSW) e sul (S).

Local	Data	Tempo	Condição operacional	Direção	Vel. (m/s)	Temp. (°C)	UR (%)
Gate 8 CLI	09/01/2026	8h00	Sistema em manutenção; sem navio atracado	WSW/S	1,4	31,2	64,0

Na área residencial, as velocidades do vento variaram de 1,1 a 2,2 m/s, as temperaturas de 29,5 °C a 33,6 °C e a umidade relativa de 60,6% a 67,0%. As direções predominantes do vento variaram entre sul-sudeste (SSE), sudoeste (SW), norte (N), leste-sudeste (ESE) e norte-nordeste (NNE). Esses resultados indicam que as coletas residenciais ocorreram sob diferentes condições de circulação atmosférica, com temperaturas elevadas e umidade relativa intermediária.

Tabela 8. Condições meteorológicas durante as coletas na área residencial. Norte (N); norte-nordeste (NNE); leste-sudeste (ESE); sul-sudeste (SSE); e sudoeste (SW).

Local	Data	Tempo	Condição operacional	Direção	Vel. (m/s)	Temp. (°C)	UR (%)
Macuco	12/01/2026	8h01	Ambiente interno	SSE/SW	1,2	33,6	60,6
Macuco	13/01/2026	8h00	Ambiente externo	N/ESE	1,1	29,5	64,3
Macuco	15/01/2026	8h00	Ambiente externo	SSE/NNE	2,2	29,8	67,0
Macuco	17/01/2026	8h00	Ambiente externo	N/ESE	1,2	30,8	62,3

8.5 Relação entre parâmetros meteorológicos e concentrações de material particulado

As correlações entre as concentrações de material particulado e os parâmetros meteorológicos foram avaliadas de forma exploratória. Foram considerados velocidade do vento, temperatura e umidade relativa. Como as condições operacionais variaram entre as coletas, esses resultados devem ser interpretados com cautela, pois a influência meteorológica pode ser mascarada pelo tipo de granel, pela ocorrência de chuva, pela interrupção operacional e pela diferença entre área portuária e residencial.

A relação entre velocidade do vento e MP10 foi praticamente ausente ($r = 0.07$; $n = 16$), como demonstrado na figura 5. Esse resultado sugere que, considerando todas as coletas em conjunto, a velocidade do vento isoladamente não explicou a variação das concentrações de MP10. Ainda assim, o vento pode ter efeitos opostos dependendo do contexto, favorecendo a dispersão em algumas situações e a ressuspensão de partículas em outras.

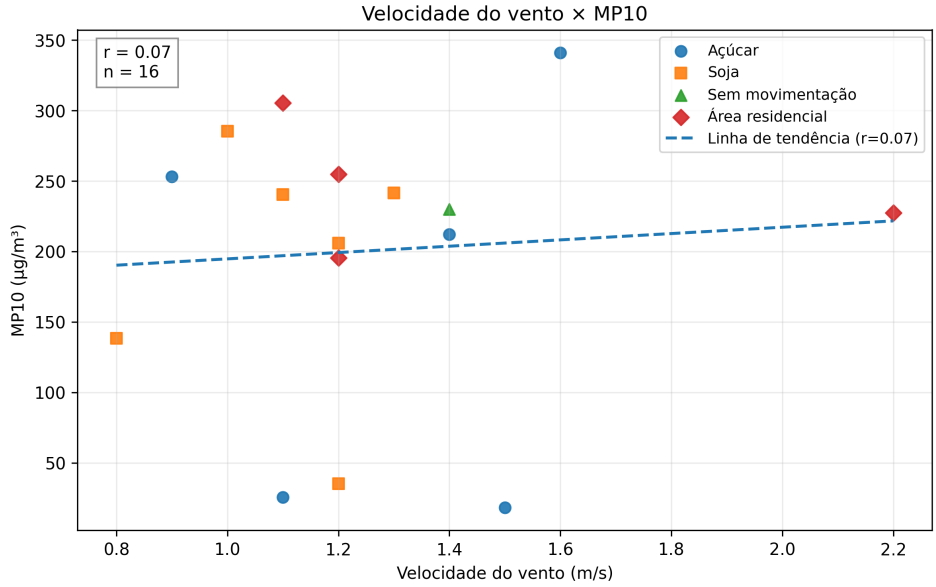


Figura 5. Correlação entre velocidade do vento e MP10. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.07; n = 16.

Para MP2,5, a correlação com a velocidade do vento foi fraca e negativa (r = -0.15; n = 17). Esse padrão indica uma tendência discreta de menores concentrações de MP2,5 em velocidades mais elevadas, mas a ampla dispersão dos pontos não permite afirmar uma relação consistente (Figura 6).

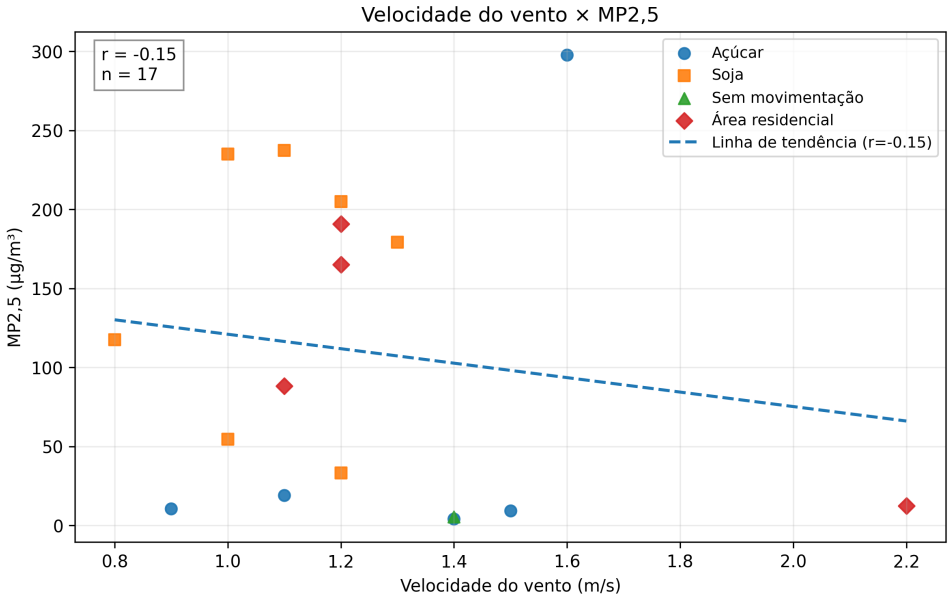


Figura 6. Correlação entre velocidade do vento e MP2,5. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = -0.15; n = 17.

A temperatura apresentou correlação fraca positiva com MP10 (r = 0.22; n = 16). Embora exista uma tendência visual de aumento do MP10 com temperaturas mais elevadas, a associação foi baixa (Figura 7). Esse resultado pode refletir a influência simultânea das condições operacionais e da umidade do material movimentado, mais do que um efeito direto da temperatura isolada.

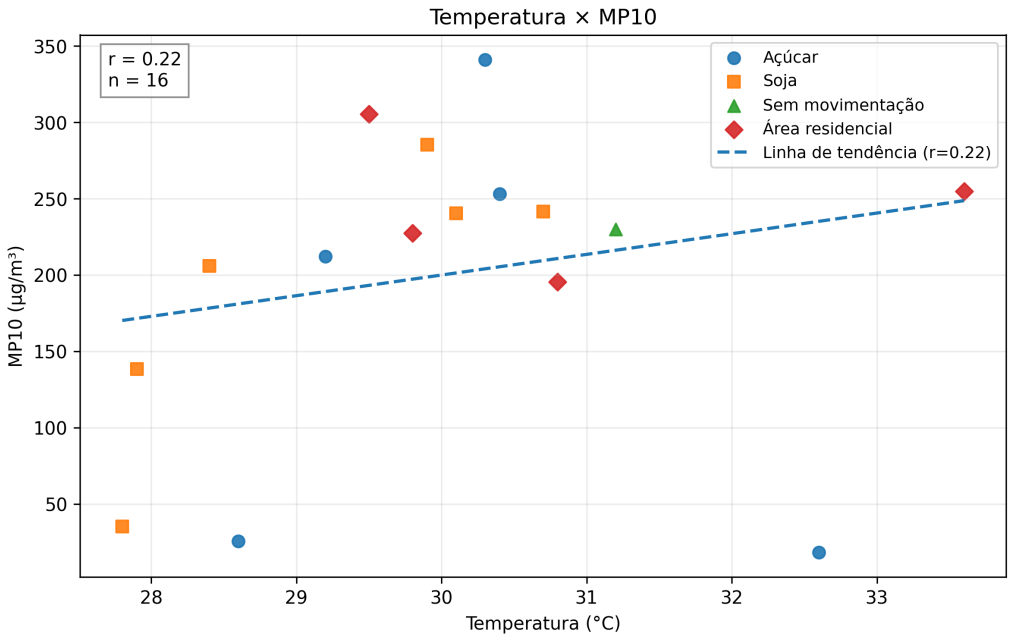


Figura 7. Correlação entre temperatura e MP10. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.22; n = 16.

A temperatura apresentou correlação positiva muito fraca com MP2,5 (r = 0.10; n = 17), representado pela figura 8. A ampla dispersão dos pontos indica que a temperatura, quando analisada isoladamente, não explicou de forma consistente a variação das concentrações de MP2,5.

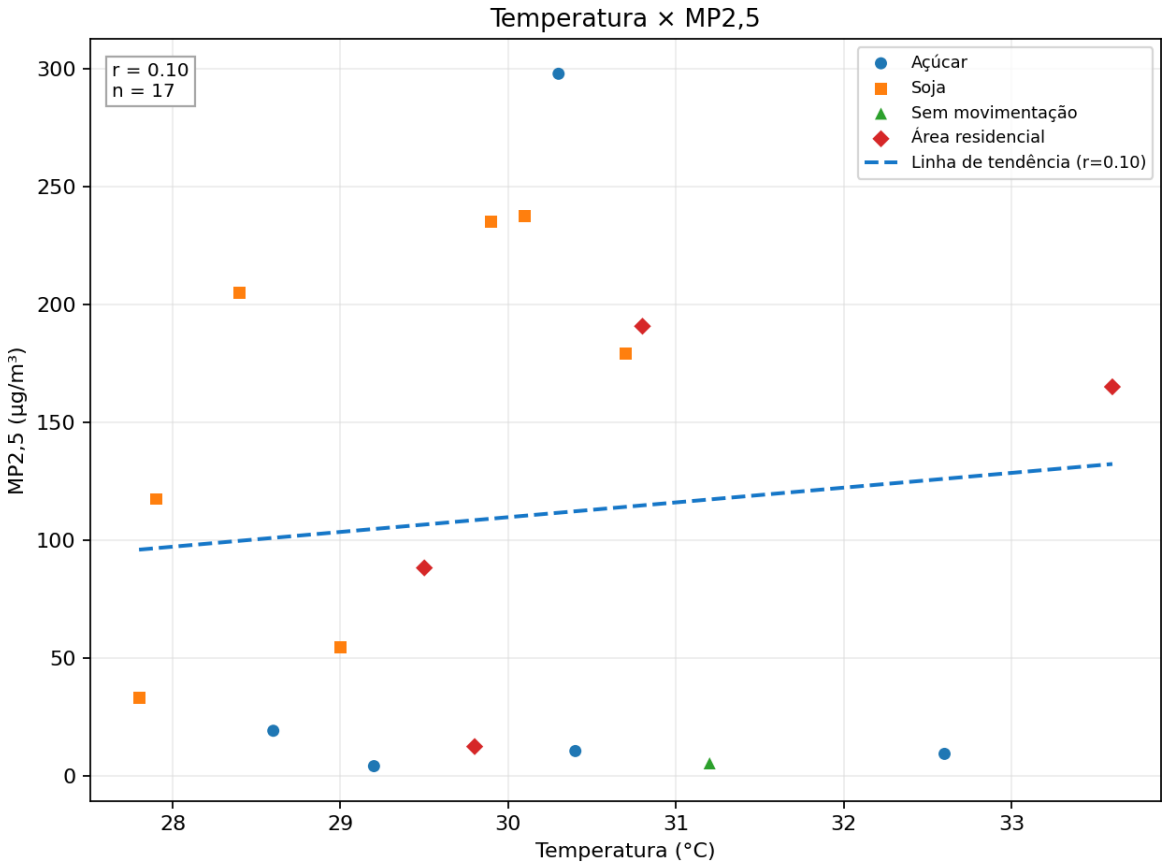


Figura 8. Correlação entre temperatura e MP2,5. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.10; n = 17.

A umidade relativa também apresentou correlação fraca positiva com MP10 (r = 0.22; n = 16), como demonstrado na figura 9. Esse resultado não indica uma relação inversa clara entre umidade e concentração de partículas. Possivelmente, a ocorrência de chuva, interrupções operacionais e variações nas fontes de emissão tiveram maior influência sobre os valores observados do que a umidade relativa medida isoladamente.

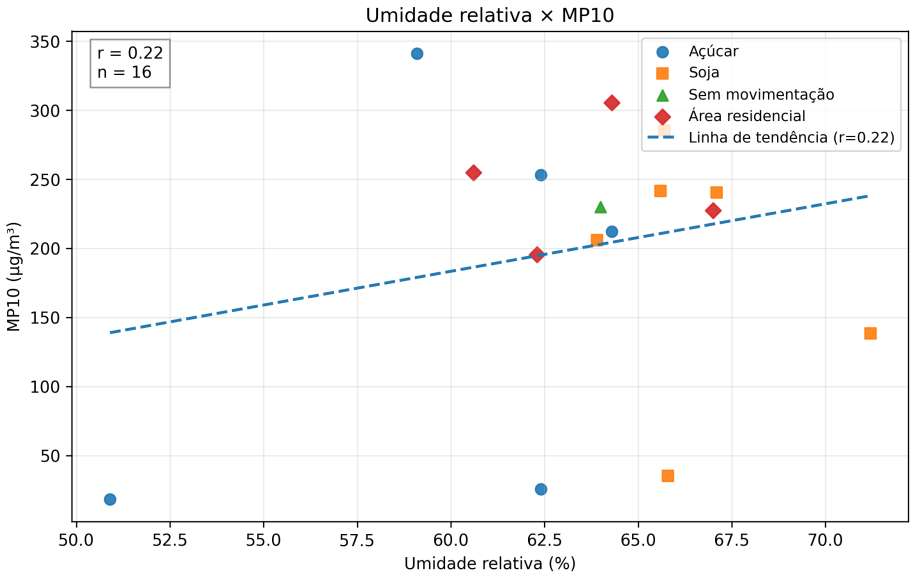


Figura 9. Correlação entre umidade relativa e MP10. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.22; n = 16.

A figura 10 representa a correlação entre a umidade relativa e o MP2,5, e apresentou correlação positiva muito fraca com MP2,5 (r = 0.11; n = 17). Esse resultado não demonstra uma relação consistente entre a umidade do ar e a fração fina, possivelmente devido à influência simultânea das condições operacionais, da ocorrência de chuva e das diferentes fontes presentes nas áreas avaliadas.

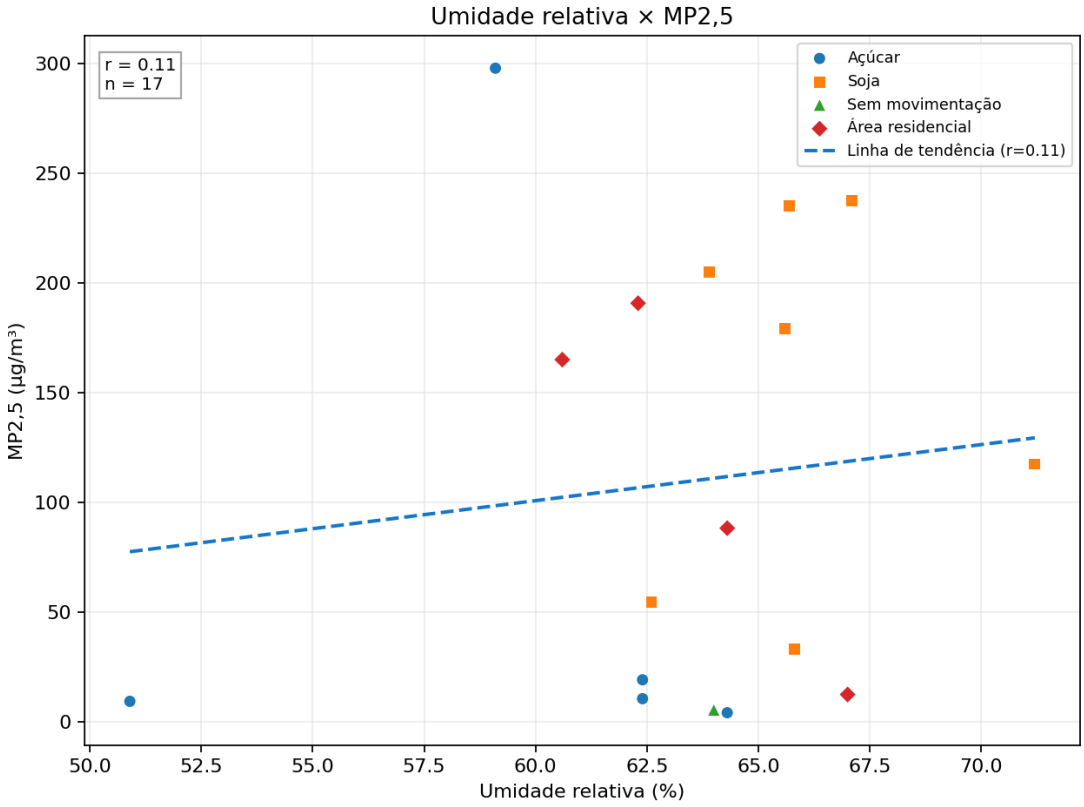


Figura 10. Correlação entre umidade relativa e MP2,5. A linha tracejada representa a tendência linear. Coeficiente de Pearson: r = 0.11; n = 17.

Em conjunto, as correlações meteorológicas foram fracas, enquanto a relação entre MP2,5 e MP10 foi mais evidente. Dessa forma, os resultados sugerem que o tipo de operação, o tipo de granel movimentado e as condições específicas de cada coleta parecem ter maior influência sobre as concentrações de material particulado do que os parâmetros meteorológicos avaliados isoladamente.

9. DISCUSSÃO

O presente estudo avaliou as concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} em diferentes condições operacionais na região portuária de Santos e em uma área residencial do bairro Macuco. O principal achado foi a ampla variabilidade entre datas, locais e condições de coleta. Essa amplitude indica que os resultados não podem ser explicados apenas pelo tipo de carga movimentada, devendo ser interpretados em conjunto com as condições operacionais, meteorológicas e as demais fontes presentes na região.

As médias de $MP_{2,5}$ foram semelhantes entre a região portuária e a área residencial, correspondendo a 108,4 e 114,2 µg/m³, respectivamente. Para o MP_{10}, a média residencial, de 245,8 µg/m³, foi superior à média portuária, de 185,6 µg/m³. Entretanto, essa comparação é exclusivamente descritiva, pois o pequeno número de amostras residenciais, a ausência de coletas simultâneas e as diferenças entre as datas e condições meteorológicas impedem concluir que uma das áreas apresentou qualidade do ar sistematicamente pior.

As maiores concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} foram registradas em 7 de janeiro, durante o embarque de açúcar com o tubo telescópico operante. Esse resultado é compatível com a possibilidade de geração e ressuspensão de partículas durante a transferência de granéis, especialmente em pontos de queda, conexões entre correias e carregamento dos porões. Contudo, sem caracterização química ou morfológica, não é possível afirmar que todo o material coletado tenha sido originado do açúcar ou da operação observada.

A atribuição de fontes em regiões portuárias é complexa, pois diferentes processos ocorrem simultaneamente. Emissões de embarcações, caminhões, locomotivas e equipamentos a diesel podem contribuir para a fração fina, enquanto poeira de cargas, solo, desgaste mecânico, obras, ressuspensão viária e aerossol marinho podem contribuir para a fração grossa. A importância relativa dessas fontes varia conforme o perfil do porto, o combustível utilizado,

a composição da frota, a intensidade do tráfego, a localização do ponto de amostragem e as condições de vento.[19-21,33,34]

Essa multiplicidade de fontes é ilustrada pela única coleta realizada durante manutenção do sistema e sem navio atracado. Nessa data, o $MP_{2,5}$ apresentou valor baixo, de 5,4 µg/m³, enquanto o MP_{10} permaneceu elevado, com 230,0 µg/m³. Esse resultado é compatível com a possível contribuição de ressuspensão de poeira nos pátios e vias, circulação de veículos, atividades em áreas adjacentes, materiais armazenados e transporte regional. Entretanto, por se tratar de apenas uma coleta, não é possível caracterizar de maneira geral as concentrações na ausência de embarque.

Em Tarragona, a caracterização química do MP_{10} identificou contribuições relacionadas ao solo, ao tráfego, aos aerossóis secundários, ao spray marinho e à ressuspensão de materiais manuseados no porto. Os autores destacaram que o vento e a circulação de veículos podem mobilizar partículas depositadas, mantendo a emissão de poeira mesmo fora do momento imediato de carregamento ou descarregamento.[35] Esse mecanismo pode ajudar a compreender concentrações elevadas de MP_{10} em situações com atividade reduzida ou sem embarque contínuo.

As coletas realizadas durante episódios de chuva apresentaram comportamentos contrastantes. Em 14 de janeiro, o MP_{10} atingiu 18,3 µg/m³, menor valor do estudo, enquanto em 16 de janeiro foi registrado valor de 253,1 µg/m³. Em 1º de abril, uma operação com soja interrompida por chuva apresentou $MP_{2,5}$ de 205,0 µg/m³ e MP_{10} de 205,8 µg/m³. Esses resultados mostram que a classificação simples “com chuva” ou “sem chuva” não é suficiente para explicar as concentrações.

A precipitação pode reduzir o material particulado suspenso por deposição úmida, mas seu efeito depende da intensidade, duração e momento de ocorrência. Como o filtro integra as partículas coletadas durante todo o período, uma chuva tardia pode não eliminar a contribuição

acumulada nas horas anteriores. Além disso, a interrupção da operação durante a precipitação modifica simultaneamente a emissão e a remoção atmosférica, dificultando a separação desses efeitos. Em estudos futuros, seria importante registrar o horário exato, a intensidade e a duração da chuva.

As correlações entre os parâmetros meteorológicos e as concentrações de material particulado foram fracas e devem ser interpretadas de forma exploratória. A velocidade do vento apresentou correlação praticamente ausente com o MP_{10} e fraca e negativa com o $MP_{2,5}$. A temperatura e a umidade relativa apresentaram correlações fracas e positivas com o MP_{10}. Esses resultados não demonstram uma influência linear isolada e consistente das variáveis meteorológicas sobre as concentrações.

A velocidade média do vento variou entre 0,8 e 2,2 m/s e permaneceu relativamente baixa durante as campanhas. Ainda assim, a ausência de correlação linear não exclui a influência do vento, que pode favorecer a dispersão das partículas em determinadas situações e aumentar a ressuspensão de materiais depositados em outras. De modo semelhante, os efeitos da umidade dependem da ocorrência de precipitação, da umidade da carga e das características higroscópicas das partículas.

A direção do vento também variou durante as campanhas e, em algumas coletas, envolveu mais de um quadrante ao longo do período. Essa variação pode ter modificado o transporte das partículas entre as áreas operacionais e o ponto de amostragem. Entretanto, a ausência de medições meteorológicas no próprio local e de uma classificação sistemática das coletas quanto à posição do amostrador a barlavento ou a sotavento limitou essa interpretação. Na Baixada Santista, a circulação costeira, as transições entre brisas marítima e terrestre e a presença da Serra do Mar podem modificar e canalizar os fluxos de ar.[25-27] Assim, dados horários obtidos no próprio ponto seriam mais adequados para representar a dinâmica atmosférica local.

As operações com soja apresentaram elevada heterogeneidade, com concentrações de $MP_{2,5}$ variando de 33,3 a 237,5 µg/m³. Em várias campanhas desse grupo foram observados valores elevados, enquanto o grupo açúcar apresentou maior contraste entre valores baixos e um episódio de concentração muito elevada. Entretanto, essas diferenças não podem ser atribuídas exclusivamente ao tipo de granel, pois as campanhas não foram padronizadas quanto ao local, às condições meteorológicas, à intensidade da operação e à quantidade de carga movimentada. A ausência de dados quantitativos sobre toneladas movimentadas e taxa de carregamento impediu avaliar a contribuição desses fatores.

O comportamento distinto entre $MP_{2,5}$ e MP_{10} também merece atenção. Como o MP_{10} inclui as partículas com diâmetro aerodinâmico de até 10 µm, incluindo o $MP_{2,5}$, a diferença entre essas concentrações pode ser utilizada como estimativa da fração grossa, correspondente aproximadamente ao intervalo entre 2,5 e 10 µm. Em 9, 16 e 26 de janeiro, essa diferença foi acentuada, sugerindo maior participação relativa de partículas grossas. Em contraste, em 27 de março e 1º de abril, as concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} foram muito próximas, sugerindo maior participação relativa da fração fina. Essa heterogeneidade pode refletir diferenças nas fontes e nos processos de emissão, mas também deve ser interpretada considerando a incerteza do método e o reduzido número de amostras.

Em Barcelona, Pérez et al. observaram maior concentração de MP_{10} no porto em relação ao fundo urbano, enquanto as concentrações de $MP_{2,5}$ foram semelhantes entre os locais. Essa diferença foi relacionada à maior participação de poeira mineral e ressuspensão na área portuária, enquanto a formação secundária contribuiu para a fração fina na área urbana.[36] Embora processos semelhantes sejam plausíveis em Santos, a ausência de especiação química impede confirmar essa interpretação.

Na área residencial, o maior valor de MP_{10} foi registrado em 13 de janeiro, com 305,4 µg/m³, enquanto o maior valor de $MP_{2,5}$ ocorreu em 17 de janeiro, atingindo 190,8 µg/m³. Esses

resultados confirmam a presença de material particulado no bairro Macuco, mas não permitem determinar sua origem.

O entorno residencial está sujeito à influência de tráfego urbano, obras, ressuspensão de poeira, vias de acesso e proximidade com áreas portuárias. A variação da direção do vento indica que diferentes setores podem ter contribuído para as concentrações. A média residencial de MP_{10} superior à média portuária não significa que o bairro seja necessariamente mais poluído. O resultado indica a existência de uma mistura ambiental complexa, cuja atribuição exigiria coletas simultâneas, múltiplos pontos, análise de trajetórias, caracterização química e modelos de receptor.

O estudo realizado no entorno do Porto de Oakland mostrou que vias com tráfego intenso de veículos pesados podem produzir gradientes espaciais acentuados de poluentes associados ao diesel e que redes convencionais de monitoramento podem não identificar pontos de pequena escala.[37] No Macuco, a proximidade com vias urbanas e acessos portuários deve ser considerada tanto como fator de confusão quanto como parte do cenário real de exposição cumulativa.

Ressalta-se que as concentrações obtidas neste estudo não são diretamente comparáveis aos registros da CETESB nem aos padrões legais de qualidade do ar, devido às diferenças relacionadas ao tipo de equipamento, à vazão, à separação das frações granulométricas, ao posicionamento do amostrador e à duração das coletas. As campanhas compreenderam períodos de aproximadamente seis a oito horas, enquanto os padrões ambientais são estabelecidos para médias de 24 horas ou anuais. Além disso, não foram identificados estudos que empregassem o mesmo modelo de amostrador e protocolo de coleta. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como medidas exploratórias das condições locais e utilizados para comparações entre as campanhas do próprio estudo, não permitindo avaliar formalmente o atendimento ou a ultrapassagem dos padrões ambientais. Por outro lado, a proximidade dos amostradores com as

operações pode ter favorecido a identificação de episódios localizados e intermitentes, que poderiam ser atenuados em períodos mais longos de monitoramento. Estudos posteriores deverão comparar simultaneamente o sistema utilizado com um equipamento de referência ou equivalente.

Além disso, os pontos portuários foram posicionados a aproximadamente 5 a 30 metros dos navios ou sistemas de carregamento. Essa proximidade favorece a detecção de condições locais, mas reduz a comparabilidade direta com estações fixas de monitoramento urbano ou estudos de fundo ambiental. Trabalhos realizados em Tarragona e Barcelona utilizaram estratégias e escalas temporais distintas, o que exige cautela na comparação quantitativa.[35,36]

A altura do ponto de amostragem também representa uma limitação. Em um porto de granéis secos na China, Shen et al. demonstraram que a distribuição das partículas varia verticalmente e pode ser influenciada pela granulometria da carga, por barreiras físicas e por sistemas de nebulização.[38] Assim, as concentrações observadas neste estudo caracterizam o nível em que o equipamento foi instalado, mas não descrevem integralmente a distribuição vertical da pluma.

A atribuição da origem das partículas exigiria análises complementares. Vanádio e níquel podem ser utilizados como marcadores de combustíveis marítimos, enquanto carbono elementar está associado a emissões de diesel. Componentes minerais, matéria orgânica e outros traçadores podem auxiliar na identificação de solo, obras ou tipos específicos de carga.[33,35-37] Sem essas informações, as concentrações devem ser interpretadas como resultado integrado das partículas presentes no ar durante o período de coleta.

Do ponto de vista sanitário, o $MP_{2,5}$ apresenta maior capacidade de atingir bronquíolos e alvéolos e está relacionado a processos oxidativos, inflamatórios e cardiovasculares.[3-12] O MP_{10} também tem sido associado a sintomas respiratórios, exacerbações de asma e DPOC e aumento de atendimentos e internações.[13-18] Entretanto, o presente estudo não avaliou

sintomas, função pulmonar, biomarcadores, internações ou mortalidade. Dessa forma, não permite demonstrar dano clínico nem estabelecer relação causal entre as concentrações ambientais e desfechos de saúde.

Os trabalhadores próximos aos shiploaders podem apresentar exposição diferente da população geral por permanecerem mais próximos às operações e repetirem essa exposição durante a jornada. Os moradores, por sua vez, podem estar submetidos a exposições menos próximas, porém potencialmente contínuas e provenientes de múltiplas fontes. Crianças, idosos e indivíduos com doenças respiratórias ou cardiovasculares preexistentes constituem grupos potencialmente mais susceptíveis.

Em Ancona, uma cidade portuária inserida em área urbana, foram observadas associações entre concentrações anuais de poluentes e mortalidade natural, cardiovascular e respiratória.[40] Esses achados reforçam a relevância de investigar populações próximas a portos, mas não podem ser extrapolados quantitativamente para Santos, pois os desenhos dos estudos, os períodos de exposição e as características populacionais são diferentes.

Os resultados sustentam a necessidade de monitoramento integrado, com coletas simultâneas em pontos próximos às operações, nos limites dos terminais, em vias de acesso, no bairro Macuco e em uma área de referência. A instalação de instrumentos meteorológicos nos próprios pontos, o registro horário das operações, a quantificação das cargas movimentadas e a análise da composição química aumentariam a capacidade de identificar gradientes e estimar a contribuição relativa das fontes.

Séries temporais contínuas também poderiam apoiar a gestão ambiental. No Porto de Gijón, dados históricos de MP_{10} e poluentes gasosos foram utilizados em modelos de previsão de concentrações.[39] Embora o número atual de coletas não permita esse tipo de análise, a implantação de monitoramento contínuo no Porto de Santos poderia auxiliar na identificação

de tendências sazonais, no reconhecimento de episódios críticos e na avaliação da efetividade das intervenções.

O estudo apresenta limitações. O número de campanhas foi reduzido e distribuído de forma desigual entre as condições operacionais. Algumas situações foram representadas por apenas uma coleta, não houve amostragem simultânea entre a região portuária e a residencial e uma coleta não apresentou resultado de MP_{10}. Os dados meteorológicos foram obtidos em uma estação que não estava localizada no mesmo ponto dos amostradores. Também não foram realizadas análises químicas, microscópicas ou microbiológicas, nem foram obtidos indicadores clínicos da população.

Apesar dessas limitações, a pesquisa apresenta relevância por ter realizado medições próximas a operações reais, incluindo embarques de açúcar e soja, períodos de manutenção, interrupções por chuva e coletas em área residencial. A integração entre informações ambientais, operacionais e meteorológicas fornece uma linha de base exploratória para estudos posteriores e para o planejamento de ações de monitoramento.

Em síntese, os resultados demonstraram ampla variabilidade espacial e temporal das concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10}. As correlações meteorológicas analisadas isoladamente foram fracas, e a variabilidade observada provavelmente resultou da combinação entre condições operacionais, fontes locais e fatores atmosféricos, sem que o desenho do estudo permita quantificar a contribuição relativa de cada componente. A presença de material particulado na área residencial reforça a necessidade de continuidade do monitoramento, mas os resultados não permitem atribuir exclusivamente ao Porto de Santos a origem das partículas, avaliar formalmente a conformidade com padrões de qualidade do ar ou estabelecer efeitos clínicos diretos sobre trabalhadores e moradores.

10.CONCLUSÕES

As concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} apresentaram ampla variação entre os locais e períodos avaliados. Foram observados valores elevados tanto na região portuária quanto na área residencial, indicando a influência conjunta de condições operacionais, fontes urbanas e fatores meteorológicos.

Os resultados não permitem atribuir exclusivamente às atividades portuárias a origem das partículas nem estabelecer efeitos clínicos diretos. Os achados reforçam a necessidade de ampliar o monitoramento, realizar coletas simultâneas e incluir a caracterização química do material particulado.

11.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. World Health Organization. Air pollution [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2026 Jun 20].

2. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.

3. Wilson WE, Suh HH. Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. J Air Waste Manag Assoc. 1997;47(12):1238-49.

4. Ghio AJ, Huang YC. Exposure to concentrated ambient particles: a review. Inhal Toxicol. 2004;16(1):53-9.

5. Balmes JR, Fine JM, Sheppard D. Symptomatic bronchoconstriction after short-term inhalation of sulfur dioxide. Am Rev Respir Dis. 1987;136(5):1117-21.

6. Uysal N, Schapira RM. Effects of ozone on lung function and lung diseases. Curr Opin Pulm Med. 2003;9(2):144-50.

7. Wessels A, Birmili W, Albrecht C, Hellack B, Jermann E, Wick G, et al. Oxidant generation and toxicity of size-fractionated ambient particles in human lung epithelial cells. Environ Sci Technol. 2010;44(9):3539-45.

8. Zhou Z, Liu Y, Duan F, Qin M, Wu F, Sheng W, et al. Transcriptomic analyses of the biological effects of airborne PM2.5 exposure on human bronchial epithelial cells. PLoS One. 2015;10(9):e0138267.

9. Jia H, Liu Y, Guo D, He W, Zhao L, Xia S. PM2.5-induced pulmonary inflammation via activation of the NLRP3/caspase-1 signaling pathway. Environ Toxicol. 2021;36(3):298-307.

10. Reis H, Reis C, Sharip A, Reis W, Zhao Y, Sinclair R, et al. Diesel exhaust exposure, its multi-system effects, and the effect of new technology diesel exhaust. Environ Int. 2018;114:252-65.

11. Kalluri R, Weinberg RA. The basics of epithelial-mesenchymal transition. J Clin Invest. 2009;119(6):1420-8.

12. Jose CC, Jagannathan L, Tanwar VS, Zhang X, Zang C, Cuddapah S. Nickel exposure induces a persistent mesenchymal phenotype in human lung epithelial cells through epigenetic activation of ZEB1. Mol Carcinog. 2018;57(6):794-806.

13. Duan RR, Hao K, Yang T. Air pollution and chronic obstructive pulmonary disease. Chronic Dis Transl Med. 2020;6(4):260-9.

14. Tian Y, Xiang X, Juan J, et al. Fine particulate air pollution and hospital visits for asthma in Beijing, China. Environ Pollut. 2017;230:227-33.

15. Ko FWS, Tam W, Wong TW, Chan DPS, Tung AH, Lai CKW, et al. Temporal relationship between air pollutants and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Hong Kong. Thorax. 2007;62(9):780-5.

16. Gehring U, Wijga AH, Brauer M, Fischer P, de Jongste JC, Kerkhof M, et al. Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life. Am J Respir Crit Care Med. 2010;181(6):596-603.

17. Fann N, Lamson AD, Anenberg SC, Wesson K, Risley D, Hubbell BJ. Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM2.5 and ozone. Risk Anal. 2012;32(1):81-95.

18. Zhou Y, Ma J, Wang B, et al. Long-term effect of personal PM2.5 exposure on lung function: a panel study in China. J Hazard Mater. 2020;393:122457.

19. Ducruet C, Polo Martin B, Sene MA, Lo Prete M, Sun L, Itoh H, et al. Ports and their influence on local air pollution and public health: a global analysis. Sci Total Environ. 2024;915:170099.

20. Tokaya JP, et al. The impact of shipping on the air quality in European port cities with a detailed analysis for Rotterdam. Atmos Environ X. 2024;23:100278.

21. International Maritime Organization. Fourth IMO greenhouse gas study 2020. London: IMO; 2020.

22. Autoridade Portuária de Santos. Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Santos. Santos: APS; 2023.

23. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Anuário Estatístico Aquaviário 2023. Brasília: ANTAQ; 2023.

24. Hilsdorf WC, Nogueira Neto MS. Port of Santos: prospection on the causes of access difficulties. Gest Prod. 2016;23:219-31.

25. Cerda C, Castro BM. Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between São Sebastião (24°S) and Cabo São Tomé (22°S). Cont Shelf Res. 2014;89:5-14.

26. Blanco CMR. Processos de intensificação orográfica da precipitação na Serra do Mar em São Paulo [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 1999.

27. Wang B, et al. Implications of sea breezes on air quality monitoring in a coastal urban environment: evidence from high-resolution modeling of NO2 and O3. J Geophys Res Atmos. 2023;128(11):e2022JD037860.

28. Piracha A, Chaudhary MT. Urban air pollution, urban heat island and human health: a review of the literature. Sustainability. 2022;14(15):9234.

29. Yavuz V. Variations in air pollutant concentrations on dry and wet days with varying precipitation intensity. Atmosphere. 2024;15(8):896.

30. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2023. São Paulo: CETESB; 2023.

31. Andrade MF, Kumar P, Freitas ED, Ynoue RY, Martins J, Nogueira T, et al. Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. Atmos Environ. 2017;159:66-82.

32. Alvarez MC. Análise da qualidade do ar nos bairros periféricos ao Porto de Santos. Rev Empreendedorismo Inov Sustent. 2017;2:56-63.

33. Mueller D, Uibel S, Takemura M, Klingelhoefer D, Groneberg DA. Ships, ports and particulate air pollution: an analysis of recent studies. J Occup Med Toxicol. 2011;6:31. doi:10.1186/1745-6673-6-31.

34. Sorte S, Rodrigues V, Borrego C, Monteiro A. Impact of harbour activities on local air quality: a review. Environ Pollut. 2020;257:113542. doi:10.1016/j.envpol.2019.113542.

35. Alastuey A, Moreno N, Querol X, Viana M, Artíñano B, Luaces JA, et al. Contribution of harbour activities to levels of particulate matter in a harbour area: HADA Project-Tarragona Spain. Atmos Environ. 2007;41(30):6366-78. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.03.015.

36. Pérez N, Pey J, Reche C, Cortés J, Alastuey A, Querol X. Impact of harbour emissions on ambient PM10 and PM2.5 in Barcelona (Spain): evidences of secondary aerosol formation within the urban area. Sci Total Environ. 2016;571:237-50. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.025.

37. Fujita EM, Campbell DE, Arnott WP, Lau V, Martien PT. Spatial variations of particulate matter and air toxics in communities adjacent to the Port of Oakland. J Air Waste Manag Assoc. 2013;63(12):1399-411. doi:10.1080/10962247.2013.824393.

38. Shen J, Feng X, Zhuang K, Lin T, Zhang Y, Wang P. Vertical distribution of particulates within the near-surface layer of dry bulk port and influence mechanism: a case study in China. Sustainability. 2019;11(24):7135. doi:10.3390/su11247135.

39. Sánchez Lasheras F, García Nieto PJ, García Gonzalo E, Bonavera L, de Cos Juez FJ. Evolution and forecasting of PM10 concentration at the Port of Gijón (Spain). Sci Rep. 2020;10:11716. doi:10.1038/s41598-020-68636-5.

40. Mei F, Renzi M, Bonifazi M, Bonifazi F, Pepe N, D'Allura A, et al. Long-term effects of air pollutants on respiratory and cardiovascular mortality in a port city along the Adriatic Sea. BMC Pulm Med. 2023;23:395. doi:10.1186/s12890-023-02629-8.

12. ANEXOS

12.1 PRODUTO TÉCNICO

RELATÓRIO TÉCNICO EXECUTIVO

MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO EM ÁREAS RELACIONADAS À MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS SÓLIDOS

Orientações para monitoramento e gestão ambiental em terminais portuários

FINALIDADE DO PRODUTO

Traduzir os resultados da dissertação em recomendações técnicas acessíveis para gestores ambientais, equipes de saúde e segurança, engenharia, manutenção e supervisão de operações com granéis sólidos.

Mestrando	Carlos Cesar Tavares
Orientador	Prof. Dr. Edgar Maquigussa
Instituição	Universidade Metropolitana de Santos – UNIMES
Programa	Mestrado Profissional em Saúde e Meio Ambiente
Versão	1.0 | Agosto de 2026

Documento técnico elaborado a partir dos resultados da dissertação do Mestrado Profissional em Saúde e Meio Ambiente da Universidade Metropolitana de Santos.

1. Finalidade

Apresentar, de forma objetiva, os resultados do monitoramento de material particulado realizado em área portuária e em área residencial do município de Santos, bem como recomendações para apoiar a gestão ambiental de terminais que movimentam granéis sólidos.

Este documento não identifica responsáveis nem estabelece relação causal entre as concentrações observadas e as atividades portuárias. Em regiões portuárias e urbanas, o material particulado pode resultar de fontes operacionais, veiculares, marítimas, industriais, urbanas, regionais e naturais.

2. Público-alvo

Administradores de terminais portuários, gestores ambientais, equipes de saúde e segurança do trabalho, profissionais de engenharia e manutenção e responsáveis pela supervisão de operações com granéis sólidos.

3. Síntese do estudo

O estudo ambiental, observacional, descritivo e exploratório compreendeu 17 campanhas realizadas entre janeiro e abril de 2026: 13 na região portuária, nos terminais Gate 8 CLI e Copersucar, e quatro no bairro Macuco. As campanhas incluíram embarques de açúcar e soja, períodos sem movimentação de granel e coletas em ambiente residencial.

As amostras foram obtidas com sistema dicotômico de pequeno volume operado a aproximadamente 5 L/min, com separação da fração fina ($MP_{2,5}$) e da fração grossa. O MP_{10} foi calculado pela soma dessas frações. As amostragens duraram aproximadamente seis a oito horas e não foram realizadas simultaneamente em todos os pontos.

4. Principais resultados

17	**4,2–297,9 µg/m³**	**18,3–341,1 µg/m³**
campanhas 13 portuárias e 4 residenciais	faixa de $MP_{2,5}$	faixa de MP_{10}

Na região portuária, as médias foram de 108,4 µg/m³ para $MP_{2,5}$ e 185,6 µg/m³ para MP_{10}. Na área residencial, foram de 114,2 e 245,8 µg/m³, respectivamente. As maiores concentrações das duas frações no conjunto das campanhas ocorreram em 7 de janeiro, durante o embarque de açúcar. Concentrações de maior magnitude também foram registradas durante operações com soja, em condição sem movimentação de granel e na área residencial.

A comparação entre as áreas é exclusivamente descritiva, devido ao número reduzido de coletas residenciais, à ausência de monitoramento simultâneo e às diferenças entre datas e condições meteorológicas.

5. Cuidados na interpretação

ATENÇÃO — NÃO UTILIZAR PARA AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE

As campanhas tiveram duração aproximada de seis a oito horas e utilizaram um sistema de amostragem distinto dos equipamentos de referência empregados no monitoramento regulatório. Os resultados não permitem avaliar formalmente o atendimento ou a ultrapassagem dos padrões de qualidade do ar e não devem ser comparados diretamente com médias de 24 horas da CETESB ou com valores de referência da Organização Mundial da Saúde.

- Os valores representam períodos e condições específicas de coleta e não médias diárias de 24 horas.
- Os pontos portuários e residenciais não foram monitorados simultaneamente.
- Uma das campanhas não apresentou resultado disponível para MP_{10}.
- Não foi realizada caracterização química, microscópica ou microbiológica capaz de diferenciar as fontes das partículas.
- Os dados meteorológicos foram obtidos em estação situada fora dos pontos de amostragem e representam as condições gerais da região.
- As concentrações não devem ser utilizadas isoladamente para atribuir contribuição a uma empresa, terminal, produto ou operação.
- O estudo não avaliou sintomas, biomarcadores ou outros desfechos clínicos de trabalhadores ou moradores.

6. Relevância para a gestão dos terminais

Embora os resultados não estabeleçam a origem das partículas, demonstram a utilidade de programas padronizados para acompanhar as variações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} em diferentes condições. A integração de dados ambientais, operacionais e meteorológicos pode apoiar decisões preventivas, avaliação de medidas de controle e comunicação técnica com trabalhadores, autoridades e comunidades.

7. Monitoramento ambiental e exposição ocupacional

O monitoramento ambiental caracteriza as concentrações no local e no período avaliados, podendo subsidiar o gerenciamento de riscos. Entretanto, não substitui a avaliação da exposição ocupacional individual. Quando for necessário estimar a exposição dos trabalhadores, devem ser empregados procedimentos específicos, incluindo amostragem pessoal e métodos tecnicamente adequados à finalidade da avaliação.

8.Recomendações para os terminais

Eixo	Recomendação
Monitoramento ambiental	Realizar campanhas periódicas em pontos operacionais, limites do terminal e áreas de permanência, com períodos padronizados e, preferencialmente, equipamentos de referência ou equivalentes.
Coletas simultâneas	Monitorar simultaneamente pontos próximos às operações, limites do terminal, vias de acesso, área residencial e uma área de referência, quando viável.
Registro integrado	Associar cada amostragem a data, horário, produto, etapa operacional, quantidade e taxa de carga, equipamentos em funcionamento, tráfego, limpeza, chuva, vento e ocorrências atípicas.
Meteorologia local	Obter direção e velocidade do vento, temperatura, umidade e precipitação no próprio ponto ou o mais próximo possível, registrando horário, duração e intensidade da chuva.
Controle de poeira	Inspecionar correias, transferências, vedações, aspersão, exaustão, vias e pátios; priorizar limpeza e manutenção que reduzam acúmulo e ressuspensão.
Caracterização das fontes	Incluir, em estudos futuros, análise química ou morfológica das partículas para apoiar a identificação de fontes e processos de emissão.
Saúde ocupacional	Integrar os resultados ao gerenciamento de riscos e, quando indicado, realizar avaliação pessoal da exposição com métodos específicos.
Avaliação de efetividade	Comparar campanhas antes e após intervenções, mantendo condições e métodos tão semelhantes quanto possível.

9. Conclusão

As concentrações de $MP_{2,5}$ e MP_{10} apresentaram ampla variação entre os locais e períodos avaliados. Essa variabilidade deve ser interpretada considerando conjuntamente as condições operacionais, as fontes urbanas e regionais e os fatores meteorológicos.

Em razão do caráter exploratório, da duração das campanhas e das características do método empregado, os resultados não permitem avaliar formalmente a conformidade com os padrões de qualidade do ar, atribuir exclusivamente às atividades portuárias a origem das partículas ou estabelecer efeitos clínicos diretos. Recomenda-se ampliar o monitoramento padronizado, realizar coletas simultâneas, integrar os registros ambientais e operacionais e avaliar periodicamente a efetividade das medidas de controle.

Contato institucional

Prof. Dr. Edgar Maquigussa | Universidade Metropolitana de Santos – UNIMES