



ANÁLISE DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DURANTE EPISÓDIOS CRÍTICOS DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE/RS

AMARANTA SANT'ANA NODARI - amasn@hotmail.com

Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre - FDB
Rua Quintino Bocaiúva, nº 159, apto. 1104 - Torre B
CEP: 90.440-050 - Porto Alegre/RS

CLAUDINÉIA BRAZIL SALDANHA - neiabrazil@yahoo.com.br

Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre - FDB

Resumo: *A poluição do ar é um problema grave e crescente. Os centros urbanos são os que mais sofrem com as consequências da má qualidade do ar e seus efeitos sobre a saúde pública. Pesquisas recentes da UFCSPA indicam que o ar de Porto Alegre contém, em média, o dobro de poluentes recomendados pelos padrões internacionais. O material particulado (MP_{10}), poluente que vem prejudicando silenciosamente a saúde dos gaúchos, é oriundo da queima do combustível, de carros e veículos pesados. Diante deste cenário, fez-se uma análise das condições meteorológicas durante os episódios críticos de poluição do ar em Porto Alegre, relativos ao poluente atmosférico MP_{10} . A análise estatística dos dados foi feita a partir do agrupamento de variáveis, análise de cluster. Os dados da qualidade do ar foram fornecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Compararam-se as concentrações diárias no período de 2002 a 2006 da estação fixa localizada em frente à Rodoviária de Porto Alegre/RS aos níveis estabelecidos pelo padrão de qualidade do ar vigente no Brasil (Resolução CONAMA nº 03, de 28/06/1990). Observou-se que as variáveis meteorológicas que influenciam nas concentrações de MP_{10} na área de estudo são: a velocidade do vento, a temperatura do ar e as direções do vento norte-leste. As maiores concentrações de MP_{10} ocorreram em dias quentes e com pouco vento. Foi durante o inverno, em quase sua totalidade, que ocorreram episódios críticos, com alguns casos no outono e somente um no verão.*

Palavras-chave: *Poluição atmosférica, material particulado (MP_{10}), padrão de qualidade do ar, episódios críticos de poluição do ar, variáveis meteorológicas.*

ANALYSIS OF WEATHER CONDITIONS DURING CRITICAL EPISODES OF ATMOSPHERIC POLLUTION IN THE CITY OF PORTO ALEGRE/RS

Abstract: *Air pollution is a serious and growing problem. The main urban centers are the ones who suffer most from the consequences of poor air quality and its effects on human health, ecosystems and materials. UFCSPA recent research indicates that air of Porto Alegre contains, on average, twice as many pollutants recommended by international standards. The inhalable particulate material (MP_{10}), a pollutant that has quietly damaging the health of the people borned in Rio Grande do Sul, starts with the burnable fuel, cars and trucks. Therefore, there was an analysis of the weather conditions during*



the critical episodes of air pollution in Porto Alegre, for the MP_{10} air pollutant. The statistical analysis was made from the variable grouping, cluster analysis. Data from air quality were provided by Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) and Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Daily concentrations were compared in the period 2002 to 2006 at air pollution control station located opposite the bus station in Porto Alegre / RS at the levels set by the standard of quality of the air current in Brazil (Resolução CONAMA n° 03, de 28/06/1990). It was observed that the climate variables which influence the concentrations of MP_{10} in the study area are: a wind speed, air temperature and the wind direction north-east. The highest MP_{10} concentrations occurred on hot and not breezy days. As seasonality, it was in the winter time, almost entirely, which occurred critical episodes, with some cases in the fall and only one in the summer.

Keywords: Air pollution, particulate material (MP_{10}), critical episodes of air pollution, meteorological variables.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a poluição do ar é um problema grave e crescente. Os principais centros urbanos são os que mais sofrem com as consequências da má qualidade do ar e seus efeitos sobre a saúde pública, ecossistemas e, até mesmo, materiais construtivos. A poluição atmosférica somente foi considerada um problema abrangente com o advento da Revolução Industrial, quando teve início o sistema urbano atual, em meados dos séculos XVIII e XIX, inicialmente na Inglaterra e, depois, em outros países. O homem passou a queimar, indiscriminadamente, grandes quantidades de carvão, lenha e, depois, óleo combustível. Assim, a atmosfera tornou-se insalubre, perigosa para a saúde, tendo em vista a enorme quantidade de fuligem em suspensão e compostos de enxofre, extremamente nocivos e prejudiciais à saúde em geral. A situação agravou-se ainda mais com o surgimento da primeira locomotiva e, com ela, as estradas de ferro. Após a evolução tecnológica, chegou-se ao sistema de transporte atual, com um grande grupo de poluidores do ar, os veículos automotores (BRANCO, 2004). Finaliza o mesmo autor, informando que, nos séculos XIX e XX, os centros urbanos adquiriram um novo contexto. Além de tornarem-se cada vez mais populosos e maiores, a utilização dos veículos automotores movidos a combustíveis fósseis foi crescente. Com isso, surgiram os chamados episódios críticos de poluição do ar em diversos lugares do mundo. Caracterizam-se pela pequena duração (que pode variar de minutos a alguns dias) e por provocar consequências graves. O elevado crescimento da população mundial, que no início do século XX era de aproximadamente 1,5 bilhão de pessoas, saltou para 6 bilhões no final do mesmo século, contribuiu, e muito, para o aumento de emissões nocivas atmosféricas. Essa explosão demográfica acarretou o aumento do consumismo e do padrão de vida.

Dessa forma, observa-se que a poluição atmosférica tornou-se uma ameaça à saúde dos habitantes de grandes centros urbanos, e isto não é diferente em Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisas recentes da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSA) ressaltam que o ar da Capital contém, em média, o dobro de poluentes recomendados pelos padrões internacionais (G1, 2013). O material particulado (MP), poluente que vem prejudicando silenciosamente a saúde dos gaúchos, é oriundo, principalmente, da queima do combustível de carros e veículos pesados e também do atrito, de seus pneus no asfalto.

O município de Porto Alegre/RS convive com o aumento dos níveis de poluição atmosférica, principalmente pelo material particulado em dispersão. Sabe-se que quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito sobre a saúde, ou seja, quanto mais fina a partícula, mais profundamente ela penetra no aparelho respiratório. Assim, a partir de 1990, a legislação brasileira passou também a se preocupar com as Partículas Inaláveis (PI), menores que 10 μm , originadas do processo de combustão industrial, de veículos automotores e do aerossol secundário (formado na atmosfera). Partículas minúsculas como as emitidas por veículos, principalmente os movidos a diesel,



podem ser menores do que a espessura de um fio de cabelo. Partindo do exposto, a pesquisa investiga a importância da análise das condições meteorológicas durante os episódios críticos de poluição do ar no município de Porto Alegre, relativos ao poluente atmosférico denominado material particulado (MP).

1.1. Poluição Atmosférica

Entende-se por poluição atmosférica a presença de poluentes no ar devido a substâncias produzidas por fenômenos naturais, ou geradas pelas atividades antropogênicas em quantidades, que podem ser prejudiciais para a vida humana, vegetal ou animal, afetar estruturas e materiais produzidos pelo homem e ocasionar alterações nas condições climáticas ou meteorológicas, que impedem o desfrutar pleno da vida e das propriedades (VIEIRA, 2009). A Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990 (BRASIL, 1990) é o diploma legal que conceitua poluente atmosférico, a saber:

Art. 1º - São padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Parágrafo Único - Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- II - inconveniente ao bem-estar público;
- III - danoso aos materiais, à fauna e flora.
- IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. (BRASIL, 1990)

O recurso ar é utilizado pelas comunidades sem parcimônia, pelo fato de se estar disponível livremente, sem qualquer ônus ou esforço em seu uso. Infelizmente, o resultado desse uso indiscriminado e abusivo tem como resultado episódios cada vez mais crescentes de poluição do ar. O fato é que, só muito recentemente surgiu a preocupação generalizada com o ar. A partir de alguns acidentes ocorridos, vários deles com vítimas fatais, a população vem se conscientizando de que a poluição é um problema real. Além disso, o meio científico também decidiu estudar mais profundamente o fenômeno, até então pouco conhecido, dos **episódios críticos de poluição do ar**.

1.2. Material Particulado

O material particulado, objeto de estudo desta pesquisa, é composto por partículas sólidas ou líquidas, em suspensão no ar, emitidas na forma de poeira, fumaça, fumo e névoa (PHILIPPI, JR; ROMERO; BRUNA, 2004). As principais fontes de material particulado podem ocorrer de eventos naturais ou fontes antropogênicas. As fontes naturais são as partículas de sal marinho, o pólen e a poeira ressuspensa do solo. Quanto às fontes antropogênicas, o material particulado é proveniente de processos industriais; pela queima de combustíveis fósseis, principalmente por veículos automotores com motor a diesel; pela poeira de rua ressuspensa (PHILIPPI, JR; ROMERO; BRUNA, 2004).

Sua denominação abrange uma variação de tamanho de partícula, cuja classificação se dá por partículas grossas, aquelas que o diâmetro aerodinâmico é maior que 10 µm (MP₁₀) e finas, as menores que 10 µm (MP₁₀) e 2,5µm (MP_{2,5}). Partículas totais em suspensão (PTS) são partículas com



diâmetro aerodinâmico de 70µm (VIEIRA, 2009). Na saúde humana, o tamanho das partículas representa um papel importante, uma vez que as partículas finas penetram mais profundamente, se depositando no aparelho respiratório, atingindo, inclusive, os alvéolos pulmonares, no caso das partículas submicrônicas (DERÍSIO, 2012).

1.3. Situação da Poluição Atmosférica em Porto Alegre/RS

A grande maioria das atividades diárias nas grandes cidades gera poluição do ar. Contudo, muitas pessoas não têm consciência disso. Exemplos como dirigir um automóvel, pintar uma casa, ou fazer um simples churrasco, contribuem para a contaminação atmosférica. Relata Branco (2004) que, por mais que a contribuição individual pareça ter menor grau de importância que a poluição causada por uma grande indústria, não é essa a realidade. Como exemplo, o autor cita o uso do automóvel. Sabe-se que em uma grande metrópole, existem alguns milhões de veículos, para centenas (ou milhares) de indústrias. Com isso, pequenas e numerosas fontes de poluição podem adquirir a mesma relevância de fontes maiores.

Em Porto Alegre, o clima possui influências da latitude, das massas de ar e da altitude, sendo que os ventos, durante o verão, são gerados pelos centros de alta pressão localizados no Atlântico, que amenizam a temperatura. O centro de alta pressão localizado em regiões frias determina o surgimento do Minuano, caracterizado pelo vento frio e seco no período do inverno. As maiores altitudes alcançam 300 metros, com pouca diferença de temperatura nas terras mais baixas. Já no verão, as partes mais altas e mais expostas ao vento, denotam-se temperaturas mais amenas (DORNELLES, 2004). Na Capital do Estado do Rio Grande do Sul, há um grande tráfego diário de veículos e uma concentração de indústrias que podem ser responsáveis por emissões atmosféricas. Um estudo realizado por Camargo; Lazzari e Schneider em 2005 e 2006 analisaram os elementos meteorológicos que influenciam nas concentrações de MP_{10} em Porto Alegre. A velocidade do vento e a radiação solar, com relações negativas, a temperatura do ar e as direções do vento, norte e noroeste, com relações positivas. Logo, as maiores concentrações de MP_{10} ocorreram em dias quentes, com pouco vento e nublados, sendo que, os ventos Norte e Noroeste corroboraram para este aumento (CAMARGO; LAZZARI; SCHNEIDER, 2011). Recentemente, Porto Alegre foi notícia ao ocupar o segundo lugar no *ranking* de seis capitais do País em poluição atmosférica, com uma média de partículas poluentes pequenas de 22,10 microgramas por metro cúbico. O estudo foi realizado pelo Instituto Saúde e Sustentabilidade, instituição especializada em pesquisas de impacto ambiental e de saúde, com apoio da Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil (APROBIO) (BSBIOS, 2015).

1.4. Fatores que influenciam a poluição do ar

De acordo com Derísio (2012), meteorologia é a ciência que estuda os fenômenos atmosféricos que se manifestam e ocorrem na natureza, uma vez que tais fenômenos exercem transporte e a dispersão de poluentes. Consideram-se alguns elementos no exame das condições meteorológicas de uma determinada área de estudo, pelos quais são destacados: o vento (velocidade, direção e porcentagem (%) de calmaria), a turbulência, a temperatura e a pressão, a umidade relativa, a radiação e a precipitação. No tocante a dispersão de poluentes, o art. 5º, §1º da Resolução CONAMA nº 03, de 28 de junho de 1990, traz a definição de episódio crítico de poluição do ar:

Art. 5º - Ficam estabelecidos os Níveis de Qualidade do Ar para elaboração do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, visando providências dos governos de Estado e dos Municípios, assim como de entidades privadas e comunidade geral, com o objetivo de prevenir grave e iminente risco à saúde da população.

§ 1º - Considera-se Episódio Crítico de Poluição do Ar a presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo,



resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos (BRASIL, 1990).

Para Vieira (2009), condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de poluentes podem ser correlacionadas com episódios críticos de poluição do ar. Para tanto, a interpretação dos dados da amostragem dos poluentes deve conter os dados de temperatura, direção e velocidade dos ventos, altura das inversões, o que permitirá identificar as variações sazonais das condições do ar e a possibilidade de identificar situações meteorológicas para situações críticas de poluição do ar. A seguir, algumas linhas a respeito dos parâmetros de maior significância:

Temperatura

A temperatura é um parâmetro meteorológico relevante para a poluição atmosférica “pela sua correlação com a intensidade da luz solar; sua alteração sazonal e diária, que pode influenciar as reações fotoquímicas, com a formação de poluentes secundários e os consequentes danos que podem ocorrer ao meio ambiente e a saúde pública”, conforme cita Vieira (2009, p.50). É o grau de aquecimento do ar. Quanto maior a inclinação dos raios solares, mais fraco é o aquecimento. A temperatura afeta a intensidade e a estrutura das turbulências do ar, as quais diluem ou difundem os poluentes atmosféricos. Dois fenômenos estão relacionados a temperatura: a Inversão térmica e as Ilhas de calor. A Inversão térmica é um fenômeno natural que corresponde à inversão das camadas atmosféricas de forma que o ar frio permanece em baixas altitudes e o ar quente nas camadas mais elevadas. Dessa forma, ocorre assim, uma desestabilização momentânea da circulação atmosférica e alteração na temperatura. As Ilhas de calor são caracterizadas pela diferença de temperatura das áreas urbanas para as rurais, mesmo quando se trata de uma única cidade. Esses fenômenos climáticos têm como fator principal a poluição atmosférica que, aliada ao elevado grau de urbanização caracterizado pela alta densidade demográfica, pavimentação, diminuição das áreas verdes e excessivo número de prédios barrando a passagem dos ventos, acabam resultando na retenção do calor na superfície.

Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar representa a porcentagem de vapor d’água que existe no ar. Quando este está saturado de água, diz-se que a umidade é de 100% (cem por cento).

Pressão atmosférica

A pressão atmosférica é a força que o ar exerce sobre a superfície terrestre. Utilizam-se diversas unidades para expressá-la. As mais usuais são mmHg (milímetros de mercúrio) e o mb (milibar), sendo este último substituído recentemente pelo hPa (hectopascal). Ao nível do mar, onde o peso da coluna de ar é máximo, a pressão equivale a 1013,25 mb, ou 1013,25 hPa, ou 760 mmHg, para uma temperatura do ar em 15°C. A pressão atmosférica está sujeita a variações horárias, diárias, semanais, estacionais, altitudinais e latitudinais.

Vento

O vento é o primeiro mecanismo atmosférico de transporte. É o resultado das diferenças de pressão em função do aquecimento ou resfriamento da atmosfera pelo Sol (DERÍSIO, 2012).

Para Vieira (2009), a trajetória e diluição dos poluentes dependem da direção e velocidade dos ventos. Esses mecanismos, expressos pela rosa dos ventos, podem relacionar informações que permitem conhecer a direção das massas de poluentes do ar, através das fontes contribuintes e da avaliação dos resultados de medições.

Estabilidade atmosférica

Segundo Derísio (2012, p. 121), a estabilidade atmosférica “está relacionada com os movimentos ascendentes e descendentes de volumes de ar. Ela depende também da velocidade do



vento, da turbulência atmosférica, do gradiente de temperatura, da insolação, da chuva, da neve de outras condições climáticas”. Portanto, a estabilidade atmosférica traz influências na taxa com a qual os poluentes são dispersos no ar limpo. Ou seja, uma parcela de poluentes do ar emitida quando o ar está instável, é melhor misturada do que quando o ar está estável, pois a estabilidade inibe o transporte dos poluentes no ar.

1.5. Qualidade do ar

Padrões de qualidade do ar

Sob o aspecto legal, o nível de referência de poluição atmosférica é denominado Padrão de Qualidade do Ar. Em 1990 foi definido, pela Resolução nº 03 do CONAMA (BRASIL, 1990), os valores medidos em concentração de poluentes, dos padrões nacionais de qualidade do ar para Partículas Totais em Suspensão (PTS), Fumaça, Partículas Inaláveis (MP₁₀), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Dióxido de Enxofre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO) e Ozônio (O₃), conforme Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário µg/m ³	Padrão Secundário µg/m ³	Método de Medição
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas*	240	150	Amostrador de Grandes Volumes
	MGA**	80	60	
Partículas Inaláveis (PI)	24 horas*	150	150	Separação Inercial/Filtração
	MAA***	50	50	
Fumaça	24 horas*	150	100	Refletância
	MAA***	60	40	
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 horas*	365	100	Pararosnilina
	MAA***	80	40	
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1 hora*	320	190	Quimiluminescência
	MAA***	100	100	
Monóxido de Carbono (CO)	1 horas*	40.000	40.000	Infravermelho não Dispersivo
		35 ppm	35 ppm	
	8 horas*	10.000	10.000	
Ozônio (O ₃)		9ppm	9ppm	Quimiluminescência
	1 horas*	160	160	

* Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

** Média geométrica anual.

*** Média aritmética anual.

Fonte: Resolução CONAMA n.º. 03 de 28/06/1990 (BRASIL, 1990)

A mesma Resolução estabelece os critérios para Episódios Agudos de Poluição do Ar, apresentados na Tabela 2:



Tabela 2: Critérios para Episódios Agudos de Poluição do Ar

Poluente	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas Totais em Suspensão (PTS) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas	375	625	875
Partículas Inaláveis (PI) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas	250	420	500
Fumaça $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas	250	420	500
Produto SO_2 x PTS $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas	65.000	261.000	393.000
Dióxido de Enxofre (SO_2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas	800	1600	2100
Dióxido de Nitrogênio (NO_2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 1 horas	1130	2260	3000
Monóxido de Carbono (CO) Ppm -8 horas	15	30	40
Ozônio (O_3) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 1 horas	400	800	1000

Fonte: Resolução CONAMA n.º. 03 de 28/06/1990 (BRASIL, 1990)

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

O município de Porto Alegre possui cerca de 1,409 milhão de habitantes, sendo a 10ª cidade mais populosa do Brasil; com um PIB de aproximados R\$ 43,0 bilhões (US\$ 18,7 bilhões) e a 7ª cidade mais rica do Brasil. É a capital do Rio Grande do Sul, que é o Estado mais meridional do Brasil, situado na fronteira com o Uruguai e a Argentina, que possui, por sua vez, cerca de 11,1 milhões de habitantes e um PIB de R\$ 310,5 bilhões. Situa-se na fronteira leste do Estado, sobre uma península, junto à desembocadura do Rio Guaíba (formado por 05 rios) na Lagoa dos Patos, que constitui a maior lagoa de água doce do mundo (IBGE, 2015).

2.2. Metodologia

A metodologia baseia-se em quatro etapas principais:

1. Levantamento dos dados de qualidade do ar no município de Porto Alegre junto à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – FEPAM/RS;
2. Definição dos episódios críticos de poluição do ar;
3. Levantamento da série de dados meteorológicos (temperatura do ar; pressão atmosférica, umidade relativa do ar; velocidade e direção do vento, perfil atmosférico);
4. Identificação de quais as variáveis meteorológicas apresentam a maior influência sobre a qualidade do ar, através da análise de *cluster*, componentes principais.



Análise estatística

O método de análise por componentes principais procura encontrar um novo conjunto de variáveis que retenham o máximo de variância, através de uma combinação linear dos dados originais (WILKS, 1995). Para verificar o agrupamento entre as variáveis foi utilizada a análise de *clusters* que apresentam a vantagem de reduzirem o espaço multidimensional a uma medida de distância entre os objetos, sendo esta representada em um espaço bidimensional, muito mais simplificado do que o espaço multidimensional (MARDIA; KENT; BIBBY, 1995). A análise de *cluster* busca agrupar elementos de dados baseando-se na similaridade entre eles.

2.3. Dados da qualidade do ar

Em Porto Alegre existem três estações fixas instaladas de monitoramento da qualidade do ar, gerenciadas pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (Fepam). A primeira está localizada no canteiro central do Largo Edgar Koëtz, em frente à Rodoviária; a segunda está na Avenida Silva Só, 340, Bairro Santa Cecília; e a última se encontra na Rua Felizardo, 750, Bairro Jardim Botânico (FEPAM, 2015).

2.4. Análise do MP₁₀

Nesta pesquisa foram utilizadas as medições do material particulado inalável (MP₁₀) da estação fixa localizada em frente à Rodoviária de Porto Alegre/RS (Figura 1), instalada na região urbana do município, com coletas de 24 horas para todo o período do presente trabalho.

Para analisar as concentrações de MP₁₀ foram utilizados dados fornecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, Estado do Rio Grande do Sul, (FEPAM), referentes às concentrações diárias de MP₁₀, de 2002 a 2006.).

2.5. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram extraídos do 8º Distrito Meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Porto Alegre/RS (Figura 1), referentes às variáveis meteorológicas, de 2002 a 2006, provenientes da estação de superfície automática do INMET, localizada no Bairro Jardim Botânico.

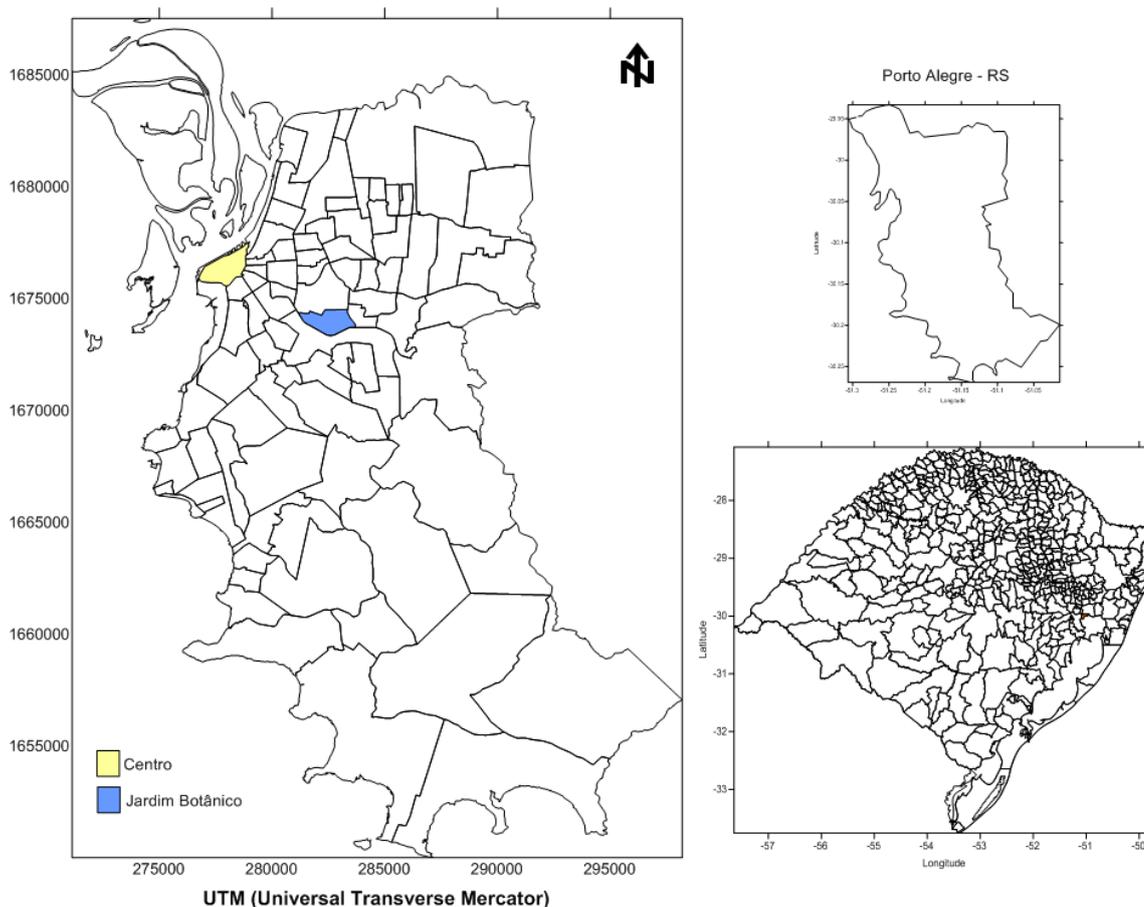


Figura 1: Mapa de Localização da estação de Qualidade do Ar da FEPAM e da estação meteorológica do INMET.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerou-se o período compreendido entre 01/01/2002 a 04/12/2006, para efeito das análises considerados episódios críticos de poluição do ar, conforme Resolução CONAMA nº 03, de 28/06/1990 (BRASIL, 1990), sendo classificados em: atenção (acima de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alerta (apresentadas, contabilizando 683 episódios que ultrapassaram os padrões primários de qualidade do ar para MP_{10} (acima de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) utilizados como referência nesse trabalho. Deste total, 133 casos foram acima de $420 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e emergência (acima de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

A Resolução CONAMA nº 03, de 1990 (BRASIL, 1990) estabeleceu o valor de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como padrão nacional diário para o MP_{10} em suspensão no ar. As Figuras 2, 3 e 4 mostram os episódios que ultrapassaram os padrões de qualidade do ar.

Do total de 683 casos durante o período da pesquisa, 139 ocorreram nos anos de 2002-2003; 237 casos em 2004 e 307 nos anos de 2005-2006. A concentração mais alta de MP_{10} encontrada foi de $855,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no dia 29/06/2002, no inverno, conforme a Figura 3.

As Figuras 2, 3 e 4 indicam, também, os episódios críticos de poluição do ar, sendo 9 episódios considerados de emergência, 9 episódios de alerta e 115 de atenção, totalizando 133 episódios críticos de poluição do ar referentes ao material particulado inalável (MP_{10}).

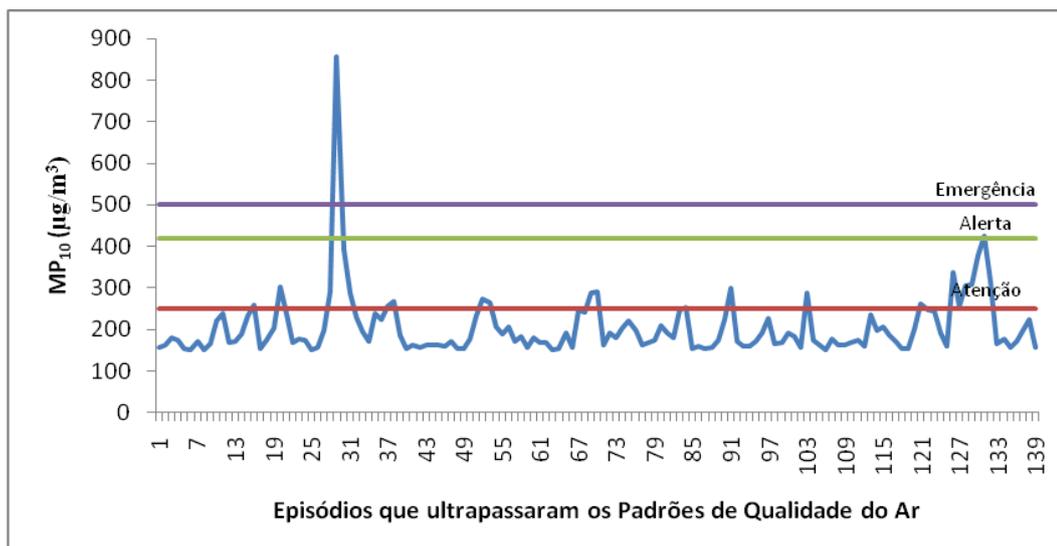


Figura 2: Episódios que ultrapassaram os padrões de qualidade do ar (acima de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) nos anos de 2002-2003.

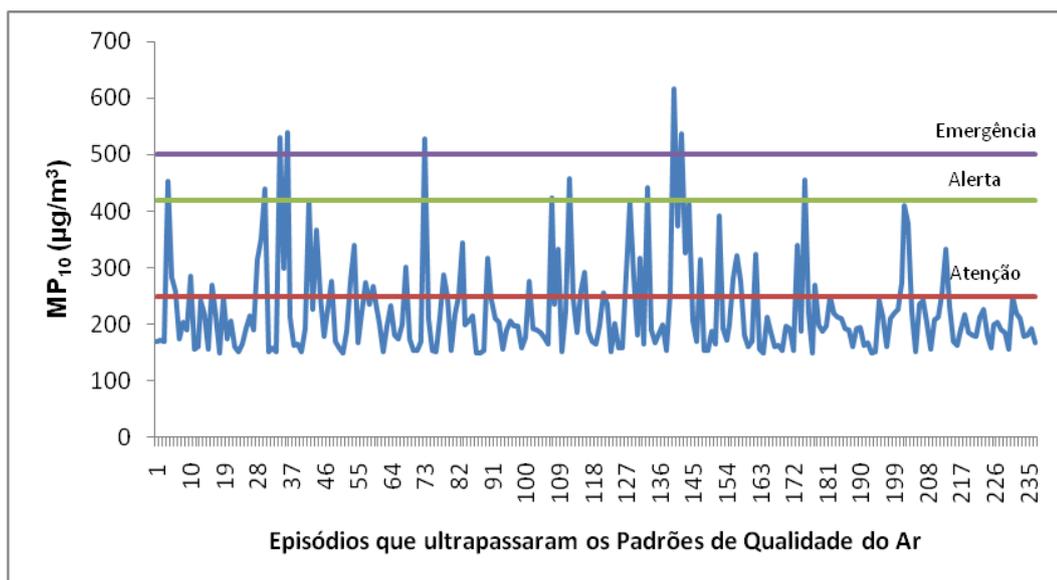


Figura 3: Episódios que ultrapassaram os padrões de qualidade do ar (acima de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) no ano de 2004.

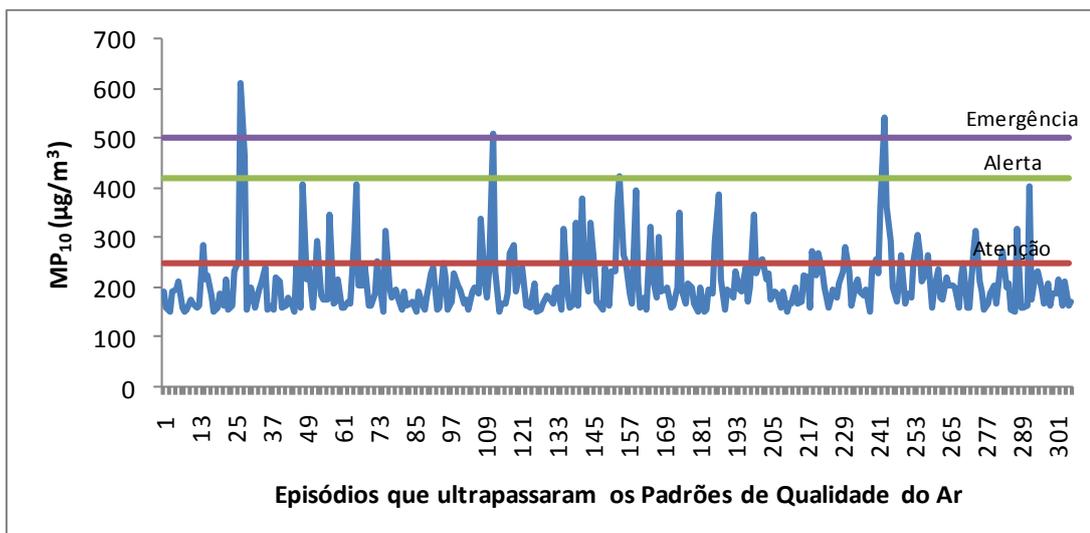


Figura 4: Episódios que ultrapassaram os padrões de qualidade do ar (acima de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) nos anos de 2005-2006.

3.1. Análise exploratória dos dados concentração de MP_{10} no município de Porto Alegre/RS

A Tabela 3 apresenta uma abordagem sazonal da concentração de MP_{10} , conforme os dados do período de estudo, frente aos 133 episódios críticos de poluição do ar encontrados na pesquisa, de acordo com a Resolução CONAMA nº 03, de 1990 (BRASIL, 1990):

Tabela 3: Avaliação Sazonal da Qualidade do ar em Porto Alegre/RS

Avaliação Sazonal da Qualidade do Ar em Porto Alegre/RS			
Estação do ano	ATENÇÃO	ALERTA	EMERGÊNCIA
Verão	1	0	0
Outono	17	2	1
Inverno	88	7	8
Primavera	9	0	0

Percebe-se que o período de inverno compreende os maiores casos de episódios críticos, relativos a concentração de MP_{10} , sendo 103 dos 133 episódios contabilizados. Logo atrás vem o outono, apresentando 20 casos. O verão é a estação do ano que aparece em menor número, concordando com o estudo de De Barros (2014), realizado entre 2011 e 2014, que mostrou que a máxima concentração diária de MP_{10} ocorreu no inverno, seguido do outono e, em menor escala, no verão.

A diferença de concentração do material particulado referente a sazonalidade (Tabela 3) é que, ao contrário do verão, quando as condições atmosféricas contribuem para uma maior diluição dos poluentes através da instabilidade atmosférica, que prevalece neste período, no inverno tem-se a estabilidade atmosférica, com pouca movimentação das camadas de ar, o que favorece a concentração de poluentes. Além disso, no inverno é comum a ocorrência do fenômeno inversão térmica, o que eleva a concentração dos poluentes.

3.2. Análise das variáveis climáticas em relação as partículas inaláveis (MP₁₀)

A relação entre as variáveis climáticas e as partículas inaláveis pode ser entendida a partir da análise de *cluster*. No dendrograma da Figura 5, a escala vertical indica o nível de similaridade e no eixo horizontal as variáveis analisadas, quanto menor a distância entre as variáveis maior a similaridade. A análise de *cluster* permitiu a verificação da associação entre as variáveis meteorológicas e a concentração de poluentes. A partir dessa técnica observaram-se dois grupos principais: (1) partículas inaláveis, velocidade do vento, temperatura do ar e, (2) umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

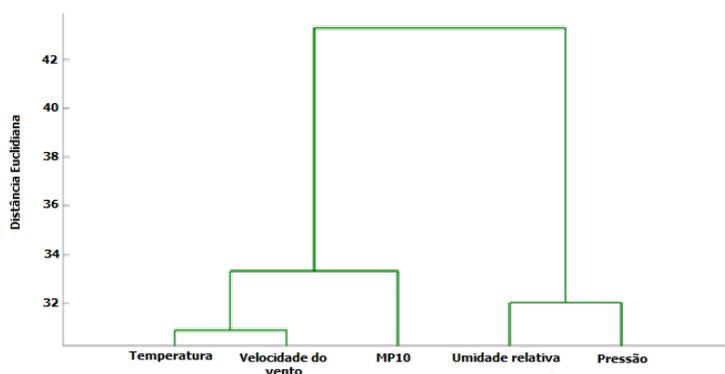


Figura 5: Dendrograma entre as variáveis meteorológicas e a concentração de MP₁₀.

De acordo com as análises de agrupamento (Figura 5), a velocidade do vento e a temperatura, concorrem para baixa qualidade do ar observada na área urbana do município. A partir do resultado do dendrograma, observa-se que o MP₁₀ tem maior similaridade com as variáveis meteorológicas velocidade dos ventos e a temperatura, por estar mais próximo da distância euclidiana. Isso não quer dizer que a umidade relativa e a pressão atmosférica não estejam relacionados ao poluente. Entretanto, são variáveis que apresentam menores contribuições, pois estão mais afastadas, de acordo com a leitura do gráfico.

Com relação à influência da velocidade dos ventos sobre a poluição atmosférica na série temporal do material particulado, foram definidas na Tabela 4 as velocidades de cada vento, conforme a Escala de Beaufort. Com isso, observou-se um aumento significativo na concentração do material poluente quando o mesmo é de baixa velocidade (entre a aragem e a calmaria), concordando com o estudo de Camargo; Lazzari e Schneider (2011) em que, quanto maior a velocidade do vento, menor serão as concentrações de MP₁₀. A velocidade do vento é um fator meteorológico importante na dispersão atmosférica, pois a turbulência mecânica aumenta a mistura e a diluição, e é criada pela ação do vento.

Tabela 4: Resultados da velocidade dos ventos em m/s, conforme a Escala de Beaufort

	Calmaria 0-02	Aragem 0,3-1,5	Brisa Leve 1,6-3,3	Brisa Fraca 3,4-5,4
Acima de 150	38%	49%	12%	1%
ATENÇÃO	41%	43%	16%	0%
ALERTA	13%	88%	0%	0%
EMERGÊNCIA	56%	33%	11%	0%

Quanto aos resultados encontrados na temperatura, em graus Celsius (°C) (Tabela 5), observou-se que, em temperaturas mais baixas, ocorreram menos episódios críticos de poluição do ar que em temperaturas mais altas (na faixa entre 20-30°C), concentrando 67% dos casos de emergência. Esse resultado vem ao encontro do que diz o estudo de Camargo; Lazzari e Schneider (2011), em que maiores concentrações de MP₁₀ ocorrem em dias quentes, indicando maiores temperaturas, com pouco vento, ou seja, quando a estabilidade do ar é alta. Isso, certamente, se deve ao fato de a área estudada ser situada junto à Rodoviária de Porto Alegre, na zona central, e por ser um local de alto tráfego veicular de entrada e saída da Capital. Além disso, possui grande concentração de asfalto em ruas e avenidas próximas, e construções de concreto, que impedem a circulação dos ventos e elevam a capacidade de absorção de calor na superfície urbana, contribuindo para a formação de "Ilha de Calor".

Tabela 5: Resultados da temperatura em graus Celsius (°C)

	0-10	10-15	15-20	20-30	30-40
Acima de 150	4%	13%	33%	45%	5%
ATENÇÃO	5%	8%	40%	46%	1%
ALERTA	0%	38%	25%	13%	25%
EMERGÊNCIA	0%	11%	22%	67%	0%

De acordo com a Tabela 6, denota-se uma contribuição para maiores concentrações de MP₁₀, na direção do vento Norte-Leste, com 63% nos episódios críticos de poluição do ar classificados em alerta (acima de 420 µg/m³). Verifica-se que as direções que contribuem significativamente para o aumento das concentrações são Norte e Leste e as que contribuem para diminuir as concentrações, no locais medido, são Sul e Oeste. Através dos resultados, pode se dizer que são ventos originários de regiões industrializadas, que usam combustível para o funcionamento das turbinas, emitindo material particulado durante suas atividades; e com fluxo intenso de veículos, causados em grande parte, pela queima de combustível fóssil.

Tabela 6: Resultados da direção dos ventos

	Norte-Leste	Leste-Sul	Sul-Oeste	Oeste-Norte
Acima de 150	38%	37%	8%	18%
ATENÇÃO	33%	42%	4%	21%
ALERTA	63%	13%	13%	13%
EMERGÊNCIA	22%	33%	22%	22%

Em comparação a outro estudo similar realizado em Porto Alegre, para o local próxima à Rodoviária, a direção norte do vento teve relação positiva, conforme Camargo; Lazzari e Schneider (2011).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar as condições meteorológicas durante os episódios críticos de poluição atmosférica no município de Porto Alegre, no período de 2002 a 2006, observou-se que os elementos meteorológicos que influenciam nas concentrações de MP₁₀ na área em estudo, são: a velocidade do vento, a temperatura do ar e as direções do vento norte-leste. Ademais, as maiores concentrações de MP₁₀ ocorreram em dias quentes e com pouco vento.



Quanto à sazonalidade, foi no período do inverno, em quase sua totalidade, que ocorreram episódios críticos, com alguns casos no outono e somente um no verão. Em especial, dois fenômenos estão relacionados: a formação de ilha de calor e inversão térmica. Esse cenário, combinado às condições adversas à qualidade do ar durante o inverno e favoráveis à dispersão de poluentes no verão através da instabilidade atmosférica, que prevalece neste período, faz com que esta estação do ano apresente as menores concentrações de MP_{10} . Pode-se constatar que grande parte do MP_{10} na área em estudo tem origem em sua localização, por ter um alto tráfego veicular de entrada e saída da Capital, aliada a ressuspensão de material do solo e atividade industrial presente pela ação dos ventos.

Enfim, por meio desta pesquisa, foi possível, ainda, observar algumas lacunas relacionadas ao controle ambiental da concentração de poluentes atmosféricos em Porto Alegre. A FEPAM, órgão ambiental responsável pela fiscalização da qualidade do ar na cidade, poderia e deveria ampliar sua rede de telemetria, consertando as estações fixas que estão inativas desde 2010. Sendo Porto Alegre uma metrópole com alto poder poluidor, deve primar por ações de monitoramento e melhorias da qualidade do ar, uma vez que ocupa o segundo lugar no *ranking* de seis capitais do País em poluição atmosférica relacionada ao material particulado.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado coragem, saúde e força para superar todos os desafios e obstáculos da minha vida. Aos meus pais, Heitor Domingos e Izabel Maria, meu irmão Bruno, minha irmã Ana por todo o amor, incentivo, apoio incondicional, enfim por tudo que sou hoje. Ao meu noivo Eduardo, pelo amor e por sempre acreditar em mim. À minha Orientadora Professora Claudinéia, pela amizade, carinho, apoio, dedicação e atenção constante neste trabalho. Sem isso, nada teria sido possível. À FEPAM/RS pela concessão dos dados, que foram imprescindíveis para a execução desta pesquisa. A todos, minha eterna gratidão.

5. REFERÊNCIAS

BRANCO, Samuel Murgel. **Poluição do ar**. 2. ed. reform. São Paulo: Moderna, 2004.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 03, de 28.06.1990. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 18 de mar. 2015.

BSBIOS. **Porto Alegre é a segunda cidade mais poluída do país.** Disponível em: <<http://www.bsbios.com/noticias/porto-alegre-e-segunda-cidade-mais-poluida-do-pais/>>. Acesso em: 15 de out. 2015.

CAMARGO, M. E.; LAZZARI, A. R.; SCHNEIDER, R. **Análise de regressão múltipla das concentrações de PM_{10} em função de elementos meteorológicos para Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul, em 2005 e 2006.** Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/9627/9627>>. Acesso em: 16 de out. 2015.

DE BARROS, Lucas Vincent Lopes. **Avaliação da relação entre parâmetros meteorológicos e concentrações de material particulado inalável (MP_{10}) no Campus da UFSC.** Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/124736>>. Acesso em 05 de out. 2015.



DERISIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4. ed. atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

DORNELLES, Beatriz. **Porto Alegre em destaque: história e cultura**. Porto Alegre: Edipucrs, 2004.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **Qualidade**. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/monitoramento.asp>>. Acesso em: 21 de mar. 2015.

G1 (2013). **Ar de Porto Alegre é duas vezes mais poluído do que aceitável**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/07/ar-de-porto-alegre-e-duas-vezes-mais-poluído-do-que-aceitavel-diz-pesquisa.html>> Acesso em: 05 de mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Porto Alegre**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 18 de mar. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Apresenta informações sobre a qualidade do ar**. Disponível em: <www.inmet.gov.br> Acesso em: 05 de ago. 2015.

MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**. London: Academic Press, 518p. 1995.

PHILIPPI JUNIOR, A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. (Orgs.). **Curso de gestão ambiental**. Barueri: Manole, 2004.

VIEIRA, Neise Ribeiro. **Poluição do ar: indicadores ambientais**. Rio de Janeiro: E-papers, 2009.

WILKS, DS. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: an introduction**. International Geophysics Series, Academic Press, v. 59, 464 p. 1995.