

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS DE PORTO ALEGRE E CORRELAÇÃO
COM FATORES METEOROLÓGICOS**

Angela Radünz Lazzari

Santa Cruz do Sul, 26 de março de 2009.

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL – UNISC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE
PORTO ALEGRE E CORRELAÇÃO COM FATORES METEOROLÓGICOS

Angela Radünz Lazzari

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental – Área de concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Maria Emilia Camargo

Co-orientadora: Rosana de Cássia de Souza Schneider

Santa Cruz do Sul, 26 de março de 2009.

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL – UNISC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE
PORTO ALEGRE E CORRELAÇÃO COM FATORES METEOROLÓGICOS

Angela Radünz Lazzari

COMISSÃO EXAMINADORA:

Jorge Orlando Cuellar Nogueira

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM - RS

Diosnel Antonio Rodríguez López

Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC - RS

Maria Emilia Camargo (Orientadora)

Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC -RS

Rosana de Cássia de Souza Schneider (Co-orientadora)

Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC – RS

Santa Cruz do Sul, 26 de março de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu marido, Marcondes Lazzari, pelo incentivo e idéias utilizadas no trabalho, aos meus filhos, Rafaela e Davi, pela paciência, aos professores, pelo ensinamento, em especial, às Professoras Orientadoras Maria Emilia Camargo e Rosana de Cássia de Souza Schneider pelo estímulo e dedicação.

Agradeço ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelo fornecimento dos dados meteorológicos e à Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM) pelo fornecimento dos dados de concentrações de poluentes.

RESUMO

O ar é um meio eficiente de dispersão de poluentes atmosféricos sendo que seu comportamento depende dos movimentos atmosféricos que ocorrem na troposfera. Neste trabalho, estudou-se o comportamento das concentrações diárias de poluentes atmosféricos, na cidade de Porto Alegre -RS, analisando fatores meteorológicos que possam influenciar nas suas concentrações. Porto Alegre é uma cidade onde há um grande tráfego diário e uma concentração de indústrias que podem ser responsáveis por emissões atmosféricas. Nesta cidade, há um monitoramento constante, com base em legislação ambiental vigente, e este controle é necessário para que a população tenha qualidade de vida, sendo possível a tomada de ações imediatas. Para a análise dos dados, foram utilizadas técnicas estatísticas descritivas, correlação linear, análise de variância e regressão múltipla. Os dados foram fornecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir das análises pôde-se concluir que: a) para os padrões nacionais de qualidade do ar, as concentrações de todos os poluentes analisados, medidos às 16h diariamente, não ultrapassaram os padrões primários e secundários; b) as maiores médias mensais das concentrações de ozônio (O_3) foram observadas nos meses de setembro a janeiro; c) os elementos meteorológicos mais influentes, neste poluente foram, a ausência de umidade e presença de radiação solar; d) os elementos meteorológicos que influenciam nas concentrações de Partículas Inaláveis foram: a temperatura média diária até as 16 h com relação positiva; as temperaturas médias diárias do ponto de orvalho, a velocidade média diária do vento e a radiação média diária, todos até as 16 horas, com relações negativas. Concluindo-se assim, que os fatores que contribuem para maiores concentrações de partículas inaláveis (PM_{10}) são os dias quentes, com pouco vento e nublados; e) as direções do vento que contribuem significativamente para o aumento das concentrações de partículas inaláveis são Norte e Noroeste e as que contribuem significativamente para diminuir as concentrações nos locais medidos são Leste e Sudeste.

ABSTRACT

The air is an efficient means to the dispersion of atmospheric pollutants and its behavior depends on the atmospheric movements that occur in the troposphere. In this work, we studied the behavior of the daily concentration of the atmospheric pollutants, in Porto Alegre City – RS, analyzing the weather factors that can influence in its concentration. Porto Alegre is a city where there is an intense traffic and a concentration of industries that can be responsible for the atmospheric emissions. In this city, there is a constant monitoring, based on the actual environmental legislation, and this control is necessary to the life quality of the population, enabling the immediate action taking. To the data analysis, we used the descriptive statistical techniques, linear correlation, variance and multiple regression analysis. The data were supplied by *Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler* – RS (FEPAM) and by *Instituto Nacional de Meteorologia* (INMET). Through the analysis we concluded that: a) to the national air quality standards, the concentration of all analyzed pollutants, measured every day at 4 p.m., did not surpass the secondary and primary patterns; b) the highest monthly average of the ozone concentration (O_3) was observed from September to January; c) the weather elements that influenced the most were the absence of humidity and the presence of solar radiation; d) the weather elements that influenced the concentration of Inhalable coarse particles were: the average daily temperature at 4 p.m. with positive relation; the daily average temperature of the dew point, the daily average wind speed and the daily average radiation, all at 4 p.m., with negative relations. We concluded, therefore, that the factors that contribute to the highest Inhalable coarse particles concentration (PM_{10}) are the hot, with little wind and cloudy days; e) the wind direction that contribute significantly to the increase of the Inhalable coarse particles concentration are North and Northeast and the ones that contribute significantly to the diminishing of the concentrations in the places measured are East and Southeast.

LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS
PM ₁₀	Partículas inaláveis de tamanho inferior a 10 µm
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Smog	É grande massa de ar poluída, com efeito visível: uma camada acinzentada na atmosfera.
SMAM	Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre
PTS	Partículas totais em suspensão
PI	Partículas inaláveis
PI ₁₀	Partículas inaláveis de tamanho inferior a 10 µm
PI _{2,5}	Partículas inaláveis de tamanho inferior a 2,5 µm
MAA	Média aritmética anual
ppm	Partes por milhão
µg m ⁻³	Microgramas por metro cúbico
µm	Micrômetro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ESEF	Escola Superior de Educação Física
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
hPa	Hectopascal
m s ⁻¹	Metros por segundo
kJ m ⁻²	Kilojoule por metro quadrado
mm	Milímetros
h	Hora
km h ⁻¹	Kilômetros por hora
Gl	Graus de liberdade
QM	Quadrado Médio

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes e efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente dos principais poluentes monitorados.	16
Tabela 2 - Padrões da qualidade do ar de acordo com a Resolução do CONAMA n° 03 de 1990.	19
Tabela 3 – Direção do vento classificada pelos graus e o nome da variável com a presença daquela direção.	25
Tabela 4 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a Rodoviária de Porto Alegre, de 2002 a 2006.	28
Tabela 5 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a Escola de Bombeiros de Porto Alegre, de 2002 a 2006.	29
Tabela 6 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a ESEF – UFRGS em Porto Alegre, de 2002 a 2006.	30
Tabela 7 - Estatísticas descritivas para os elementos meteorológicos, para Porto Alegre, em 2005 e 2006.	32
Tabela 8 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local próximo à Rodoviária, em Porto Alegre, RS.	34
Tabela 9 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local próximo à Escola de Bombeiros, em Porto Alegre, RS.	35
Tabela 10 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local junto à ESEF/UFRGS, em Porto Alegre, RS.	35
Tabela 11 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a Rodoviária de Porto alegre, em 2005 e 2006.	37
Tabela 12 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a Escola de Bombeiros, em Porto alegre, em 2005 e 2006.	38
Tabela 13 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a ESEF (UFRGS), em Porto alegre, em 2005 e 2006.	38

Tabela 14 - Correlação linear de Pearson entre as concentrações diárias de O ₃ , 16 horas, nos três locais e as variáveis meteorológicas, para Porto Alegre, de 2005 a 2006. ...	39
Tabela 15 - Análise de variância para os fatores mês e local, das médias mensais da concentração de O ₃ , para Porto Alegre, de 2002 a 2006.	40
Tabela 16 - Valores das concentrações médias mensais de O ₃ , nos locais observados, para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006, considerando as diferenças entre as médias pelo teste LSD de diferença de médias a 5%.	41
Tabela 17 - Valores das concentrações médias mensais de O ₃ , para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006, considerando as diferenças entre as médias pelo teste LSD de diferença de médias a 5%.	43
Tabela 18 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 µm, observadas no local próximo à Rodoviária, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.	44
Tabela 19 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 µm, observadas no local próximo à Escola de Bombeiros, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.	45
Tabela 20 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 µm, observadas no local próximo à ESEF (UFRGS), em Porto Alegre, em 2005 e 2006.	46
Tabela 21 - Correlações entre Partículas inaláveis e a direção dos ventos (variável dummy) às 16 horas, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das Estações Automáticas de Monitoramento do ar (vermelho) e Meteorológica (azul), na cidade de Porto Alegre, RS.	23
Figura 2 - Histogramas das variáveis referentes aos elementos meteorológicos, referentes a dados médios diários, até às 16 horas, para Porto Alegre, para 2005 e 2006.	33
Figura 3 - Concentrações médias mensais de O ₃ , para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006.	41
Figura 4 - Concentrações médias mensais de O ₃ , nos três locais em conjunto, em Porto Alegre de 2002 a 2006.	42
Figura 5 - Radiação solar média mensal, de 0 às 16 horas, para Porto Alegre, em 2005 e 2006.	42
Figura 6 - Frequência com que o vento ocorre nas devidas direções, diariamente às 16 horas, em Porto Alegre em 2005 e 2006.	47
Figura 7 - Localização das Estações Automáticas de monitoramento do ar da Fepam (em vermelho) e Estação de superfície Automática do Inmet (em azul), na cidade de Porto Alegre.	49
Figura 8 - Mapa da Região Metropolitana de Porto Alegre.	50

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
1.1 Principais poluentes atmosféricos.....	16
1.2 Dispersão dos poluentes atmosféricos	19
1.3 Emprego de ferramentas estatísticas na área de poluição atmosférica	20
2 METODOLOGIA.....	22
2.1 Ferramentas estatísticas	25
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.1 Análise descritiva dos dados.....	27
3.1.1 Estatística descritiva dos poluentes de Porto Alegre	27
3.1.2 Estatística descritiva dos parâmetros meteorológicos.....	31
3.2 Análise da correlação dos poluentes	34
3.3 Análise do ozônio troposférico	37
3.4 Análise das partículas inaláveis	43
3.5 Análise da direção dos ventos.....	47
CONCLUSÕES	51
TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXO 1 - TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS	59

INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma preocupação constante da opinião pública com relação aos impactos causados pelos poluentes no meio ambiente. Frequentemente vêm-se reportagens mostrando cenários desastrosos, resultado da ação antrópica, demonstrando os efeitos nocivos dos poluentes que impactam negativamente o ambiente natural.

O ar é apenas um dos recursos naturais que precisam ser preservados em respeito às gerações atuais e futuras. Ele é um meio eficiente de dispersão de poluentes atmosféricos sendo que, o comportamento deste, depende dos movimentos atmosféricos que ocorrem na troposfera.

Grandes cidades sofrem com a concentração elevada de poluentes e carecem de ações de remediação e minimização dos problemas. Entre estas cidades está a capital do estado do Rio Grande do Sul – Brasil que apresenta 1.420.667 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2007), uma frota de 450.867 automóveis (IBGE, 2007) e 7.914 indústrias de transformação (IBGE, 2006). Isto alerta para a necessidade de monitoramento constante, que já é realizado na parte central da cidade, avaliação da concentração dos poluentes e intensificação das ações de controle e remediação.

Assim, o monitoramento das emissões acompanhadas de uma avaliação adequada permite diagnosticar melhor a qualidade do ar, bem como seus agravantes, em uma determinada região.

Neste sentido a estatística é uma aliada para identificar os fatores que interferem nas concentrações observadas. Técnicas estatística foram utilizadas para outras cidades com resultados promissores como no Kathmandu Valley, Nepal (Shrestha e Malla, 1996), na Espanha (López-Gamero et al., 2009) e outros (Wang et al., 2009; Yorks et al. 2008; Chelani, 2009; Santos et al., 2009).

Assim, utilizando técnicas estatísticas para analisar os dados de poluição atmosférica e condições meteorológicas, pode-se contribuir para a definição de quais fatores interferem nas concentrações de poluentes e prever ações de controle.

Neste trabalho, o objetivo foi estudar o comportamento das concentrações diárias de poluentes atmosféricos da cidade de Porto Alegre - RS, procurando-se identificar os fatores meteorológicos que possam estar influenciando nestas concentrações, servindo assim, de modelo para a avaliação do plano diretor de Porto Alegre visando a redução do impacto causado pelos poluentes atmosféricos, orientando a construção de edifícios, de indústrias, e, também, o tráfego de veículos.

Assim, levando-se em conta a topografia local, as características urbanas e as suas tendências meteorológicas, analisou-se as concentrações de poluentes legislados, definindo quais as relações existentes com as variáveis meteorológicas. O estudo focou nas concentrações de material particulado (PM_{10}) em $\mu g m^{-3}$, dióxido de enxofre (SO_2) em $\mu g m^{-3}$, dióxido de nitrogênio (NO_2) em $\mu g m^{-3}$, ozônio (O_3) em $\mu g m^{-3}$ e monóxido de carbono (CO) em ppm, fornecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM); dados meteorológicos de temperatura do ar em $^{\circ}C$, umidade relativa do ar em %, temperatura do ponto de orvalho em $^{\circ}C$, pressão atmosférica hPa, velocidade do vento em $m s^{-1}$, direção do vento em graus, radiação solar em $kJ m^{-3}$ e

precipitação pluviométrica em mm, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e as ferramentas de análise utilizadas foram: estatística descritiva, correlação, análise de variância, e regressão múltipla.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A atmosfera que envolve nosso planeta tem valor inestimável. Os seres vivos dependem do ar para viverem. Muitas vezes nos perguntamos se o ar que respiramos tem boa qualidade ou se existem componentes neste ar que podem prejudicar nossa saúde. A princípio, o ar é invisível aos nossos olhos, mas dependendo das substâncias nele emitidas, ele pode se tornar visível a longas distâncias (smog), ou mesmo, invisível mas prejudicial.

A composição do ar atmosférico, ao nível do mar, apresenta cerca de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,03% de gás carbônico e o restante de outros gases (Barreto, 2000; Mozeto, 2001). De acordo com Branco e Murgel (1997) o ar atmosférico é considerado poluído quando existe uma alteração na sua composição ou propriedades, como resultado de emissões de poluentes em concentrações nocivas e inconvenientes à saúde e ao meio ambiente, por ações antrópicas.

As fontes de poluição do ar podem ser naturais, fixas ou móveis. As naturais são as que ocorrem sem interferência humana, como ventos, erupções vulcânicas, descargas elétricas, processos de decomposição, queimadas, etc. As fixas são constituídas por indústrias, atividades comerciais e queimadas, quando provocada por ações humanas. As móveis constituem os veículos automotores e são altamente poluidoras (Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre - SMAM, 2000).

1.1 Principais poluentes atmosféricos

Independente do tipo de poluição, os principais poluentes que podem estar presentes na atmosfera, e que em concentrações normais são constituintes da mesma são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), ozônio (O₃), material particulado, hidrocarbonetos gasosos e outros compostos voláteis em menor concentração (SMAM, 2000; Shirmer e Lisboa, 2008).

Na tabela 1 são informados os principais poluentes monitorados por órgãos públicos com suas respectivas fontes e efeitos causados na saúde humana e ao meio ambiente.

Tabela 1 - Fontes e efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente dos principais poluentes monitorados.

Poluente	Fontes	Efeitos nocivos à saúde e ao meio ambiente
Monóxido de Carbono (CO)	Veículos automotores	Problemas cardiovasculares; afeta nível de consciência e a visão.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Indústria, geração de energia e transporte	Dificuldades respiratórias; doenças respiratórias e pré-existentes do coração. Chuva ácida.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Veículos automotores, usinas termelétricas, indústria, comércio e residências	Problemas respiratórios e pulmonares. Redução da visibilidade. Formação de chuva ácida e de ozônio troposférico. Deteriorização da qualidade das águas através da sobrecarga de nutrientes.
Ozônio (O ₃)	Reações fotoquímicas entre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Problemas pulmonares, irritação nos olhos, nariz e garganta, envelhecimento precoce da pele, náusea, dor de cabeça, tosse, fadiga, aumento do muco, diminuição da resistência orgânica, infecções e doenças respiratórias. Diminuição da visibilidade. Ação oxidativa em materiais.
Material Particulado (PM ₁₀)	Indústrias, veículos automotores, queimadas intensionais, poeira de rua, atividades de construção, etc.	Problemas respiratórios, pulmonares, asma e alergia.

Fonte: FEPAM (2002); Braniš et al. (2009); York et al. (2009), Bailey and Solomon, 2004.

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás incolor que reage com a água formando ácidos sulfurosos como o H₂SO₃ e tende a ser convertido em sulfato, sua principal forma de

remoção da atmosfera é por deposição. Juntamente com os óxidos de nitrogênio (NO_x), os óxidos de enxofre contribuem para a formação de deposições ácidas que são nocivas ao meio ambiente e a materiais (Solberg et al., 2008).

Os Óxidos de nitrogênio (NO_x) que correspondem a sete compostos, além de participar no smog fotoquímico e serem precursores de chuva ácida, também são poderosos catalisadores interferindo no ciclo do ozônio na estratosfera (Mozeto, 2001; Shirmer e Lisboa, 2008).

O ozônio (O_3), composto de três átomos de oxigênio é encontrado normalmente na estratosfera, onde ocorrem reações fotoquímicas responsáveis por sua formação e degradação. Tem uma função vital, porém quando está na estratosfera. Na troposfera é considerado um poluente difícil de controlar, pois é produto de reações fotoquímicas.

O controle da concentração de ozônio na troposfera se dá pelo controle dos poluentes emitidos por ações antropogênicas como queima de combustível e produção industrial. Este poluente aumenta consideravelmente no verão e primavera devido à intensidade de radiação ultravioleta que incide sobre a superfície nestas estações do ano (Yorks et al., 2008).

Por último, existem as partículas totais em suspensão (PTS) que podem ser subdivididas conforme o tamanho, e são compostas de poeiras, fumos, fumaça ou névoas (partículas líquidas) (Sullivan e Prather, 2005; Saitoh et al., 2002; Ladjji et al., 2009).

Geralmente as PTS são constituídas por componentes múltiplos, tais como: sulfatos, sais, metais, partículas de carbono e sílica finamente divididas. Para fins de análise em amostradores de grandes volumes são classificadas em: partículas totais em suspensão (PTS), aquelas inferiores a $100\ \mu\text{m}$ e partículas inaláveis (PI) inferiores ou iguais a $10\ \mu\text{m}$

(PI_{10}) e inferiores a $2,5 \mu m$ ($PI_{2,5}$) (Shirmer e Lisboa, 2008).

Uma das razões pelas quais as partículas em suspensão causam preocupação é o fato de que em baixas concentrações podem levar a efeitos nocivos e o prejuízo a saúde depende de sua composição e de seu potencial carcinogênico (FEPAM, 2002).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece Padrões Nacionais de Qualidade do Ar, através da Resolução nº 03 de 28/06/1990. Estes padrões definem legalmente os limites máximos para concentrações de poluentes, que garantam a proteção da saúde e do bem estar da população em geral e definem os padrões primários de qualidade do ar que “são as concentrações de poluentes que poderão afetar a saúde da população se forem ultrapassadas” E os padrões secundários de qualidade do ar que “são níveis de concentrações de poluentes atmosféricos que se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral, se não ultrapassados”.

Os poluentes atmosféricos regulamentados pelo CONAMA são apresentados na tabela 2.

De acordo com a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA, 2007) e a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM, 2002) o monitoramento da qualidade do ar é realizado para determinar o nível de concentração dos poluentes presentes na atmosfera, e que seus resultados permitem um acompanhamento sistemático da qualidade do ar na área monitorada, como também constituem elementos básicos para elaboração de diagnóstico da qualidade do ar, subsidiando ações governamentais para o controle das emissões, bem como advertir a população em casos de risco à saúde e ao bem-estar geral.

Tabela 2 - Padrões da qualidade do ar de acordo com a Resolução do CONAMA n° 03 de 1990.

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário $\mu\text{g m}^{-3}$	Padrão Secundário $\mu\text{g m}^{-3}$
Partículas Inaláveis (PI)	24 horas ⁽¹⁾	150	150
	MAA ⁽²⁾	50	50
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 horas ⁽¹⁾	365	100
	MAA ⁽²⁾	80	40
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1 hora	320	190
	MAA ⁽²⁾	100	100
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora ⁽¹⁾	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)
	8 horas ⁽¹⁾	10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)
Ozônio (O ₃)	1 horas ⁽¹⁾	160	160

Fonte: FEPAM

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez por ano

(2) Média aritmética anual

1.2 Dispersão dos poluentes atmosféricos

Segundo Sales (2007) e Santos et al (2009) os principais elementos meteorológicos que influenciam a qualidade do ar, em uma escala local, são o vento e a estabilidade atmosférica. A dispersão dos poluentes de uma fonte depende da turbulência na atmosfera próxima. A velocidade do vento pode afetar a sua concentração, sendo que quanto maior a velocidade do vento, maior será a dispersão de contaminantes numa determinada área.

Moreira (2004) diz que a estrutura urbana tem uma importante influência sobre o campo de vento. Sua velocidade, em geral, diminui com o atrito produzido pela superfície, pois edifícios de uma área urbana colocam resistência ao fluxo do vento em relação à área rural. Grandes cidades com topografia complexa, com vales ou cadeias montanhosas, a princípio, experimentam elevadas concentrações de contaminantes do ar.

Outro fator determinante na dispersão dos poluentes é a frequência das precipitações pluviométricas, pois removem material particulado e interagem com alguns poluentes facilitando a sua deposição seca ou úmida (Sales, 2007).

1.3 Emprego de ferramentas estatísticas na área de poluição atmosférica

Na análise de relações da concentração de poluentes com elementos meteorológicos, temos na literatura, alguns exemplos de aplicação. Um deles foi apresentado por Ziomas (1995), onde analisou as concentrações de NO₂ através de modelos analíticos relacionados à sua máxima concentração na área urbana de Atenas. Este pesquisador utilizou variáveis meteorológicas nos modelos de previsão para as concentrações do poluente. As técnicas estatísticas utilizadas foram: análise discriminante para determinar combinações lineares para o conjunto de variáveis e análise de regressão múltipla para estimar a máxima concentração do dia seguinte.

Em 1996, o autor Glen apresentou um modelo temporal que quantifica a relação entre valores (média) mensais das emissões de CO, médias mensais de concentrações de CO e dispersão meteorológica. Analisando 8 cidades, em 8 anos (1984-1991), utilizou regressão não-linear para determinar os parâmetros meteorológicos. Resultou em um bom ajustamento e aplicabilidade ampla, permitindo avaliar a sazonalidade dos poluentes.

Shively (1999) utilizou um modelo de regressão semiparamétrica para analisar relação entre concentrações de ozônio, variáveis meteorológicas e tendências temporais. Este modelo produz resultados paralelos aos da regressão linear, permitindo determinar a forma do modelo, como acontece em modelos não-paramétricos. Foram analisados dados de 1983 a 1995, em Houston, TX, em quatro locais, resultando em uma explicação da variação do log(ozônio) em mais de 60%.

Em Cogliani (2001) tem-se um estudo do índice de poluentes atmosféricos, envolvendo concentrações de NO₂, CO e O₃, em Florença, Milão e Vicenza, Itália, relacionando com variáveis meteorológicas, como temperatura e velocidade do vento, e também com concentração do dia anterior. Utilizando correlação parcial múltipla resultou em valores altos nas três cidades, de 0,7 a 0,85.

Conforme Silva (2003) há um monitoramento da qualidade do ar, em 8 estações, na cidade de Santiago, no Chile, onde coletam continuamente informações sobre os níveis de poluição e dados meteorológicos. Com o objetivo de verificar a eficiência das informações obtidas pelas estações e a possibilidade de descartar a utilização de alguma estação ineficiente, na medição dos poluentes, diminuindo custos, foi utilizado um índice de eficácia multivariada. Com ele foi medido a eficácia das medições na ausência de uma ou mais estações. Concluiu-se que retirando uma ou duas estações de funcionamento tiveram 79 e 80 %, respectivamente, de eficiência nos resultados.

Em outros artigos, Neto et al. (2004 e 2005), apresentaram modelos estatísticos de previsão da qualidade do ar para determinar concentrações de ozônio (O₃) e material particulado (PM₁₀). Inicialmente foi utilizada a análise de correlação entre os poluentes e elementos meteorológicos. Em seguida, foram desenvolvidos modelos de previsão, através da regressão linear múltipla e regressão em árvore (stepwise), resultando em uma variância explicada pelos modelos acima de 72%. Como resultado, os autores obtiveram que os maiores valores de O₃ se dão nos meses de maior temperatura, principalmente na primavera, e quanto aos resultados do PM₁₀, a variável mais importante foi o valor do dia anterior, significando que os valores das concentrações são influenciadas pelo valor observado no dia anterior.

Também em 2005, Torres fez uma análise dos fatores que influenciam nas concentrações de material particulado na cidade de Juiz de Fora - MG. Utilizou técnicas estatísticas descritivas para analisar dados e concluiu que os fatores que influenciam nas altas concentrações são: o fluxo de veículos, direção e velocidade do vento.

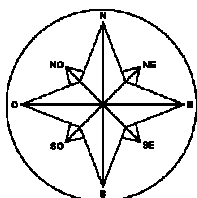
2 METODOLOGIA

Para analisar as concentrações de poluentes e os fatores que afetam a dispersão dos mesmos, foram utilizados dados fornecidos pela FEPAM, referentes às concentrações diárias de poluentes atmosféricos, e dados fornecidos pelo INMET, referentes às variáveis meteorológicas. Os dados utilizados nas análises são referentes aos anos de 2005 e 2006, para as variáveis meteorológicas, e de 2002 a 2006, para as concentrações de poluentes.

Os dados referentes às concentrações de poluentes atmosféricos foram medidos pela Rede de Monitoramento Automático da Qualidade do Ar (Ar do Sul). De acordo com a FEPAM (2002), esta Rede opera desde dezembro de 2001 e abrange a Região Hidrográfica do Guaíba. Neste trabalho, foram utilizadas informações de apenas três estações automáticas localizadas no município de Porto Alegre. A localização destas estações (Figura1) são as seguintes: a) No Centro de Porto Alegre, próximo a Estação Rodoviária, no Largo Edgar Koetz, cujas coordenadas geográficas são 478827 e 6678554; No Bairro Santana, junto a Escola de Bombeiros de Porto Alegre, na Av. Silva Só, 340, cujas coordenadas geográficas são 480422 e 6676697; no Bairro Jardim Botânico, junto a Escola de Educação Física (ESEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), na Rua Felizardo, 750, com as coordenadas 482509 e 6675821.

Os dados fornecidos são dos seguintes poluentes: Partículas Inaláveis menores que 10 μm (PM_{10}) em $\mu\text{g m}^{-3}$, Dióxido de Enxofre (SO_2) em $\mu\text{g m}^{-3}$, Dióxido de Nitrogênio

(NO₂) em µg m⁻³, Ozônio troposférico (O₃) em µg m⁻³ e Monóxido de Carbono (CO) em ppm.



Fonte: FEPAM e INMET

Figura 1 - Localização das Estações Automáticas de Monitoramento do ar (vermelho) e Meteorológica (azul), na cidade de Porto Alegre, RS.

De acordo com a FEPAM (2002), as amostragens foram realizadas automaticamente por equipamentos que utilizam princípios físicos e químicos, e que, no instante em que o ar é coletado são gerados os dados de concentrações e enviados periodicamente para a Central de Monitoramento Automático, permitindo o acompanhamento da qualidade do ar nestes locais. Os métodos de medição utilizados,

específicos para cada poluente foram: Radiação Beta para o PM_{10} ; Fluorescência Ultravioleta para o SO_2 ; Quimiluminescência para o NO_2 ; Fotometria Ultravioleta para o O_3 ; Absorção de Radiação Infravermelho para o CO.

Os dados fornecidos apresentaram lacunas de tempo, ocasionadas por falta de energia ou comunicação, manutenção ou calibração dos equipamentos e avarias técnicas.

Além disso, os dados fornecidos pela FEPAM foram os divulgados diariamente a partir do índice de qualidade do ar das últimas 24 horas, regulamentados pela legislação, Resolução nº 03 de 28/06/1990 do CONAMA, que contém a análise para cada poluente conforme: médias aritméticas de 24 horas para o SO_2 ; médias aritméticas de 24 horas para o PM_{10} ; máxima diária de 1 hora para o NO_2 ; máxima diária de 1 hora para o O_3 ; máxima média móvel de 8 horas diária para o CO.

Quanto aos dados meteorológicos de Porto Alegre disponíveis para a realização do trabalho, provêm da estação de superfície automática do INMET. Uma estação meteorológica de superfície automática é composta de uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos que integra os valores observados minuto a minuto e os automaticamente a cada hora (INMET, 2007). As coordenadas da estação meteorológica automática de Porto Alegre: latitude – 300500; longitude – 511666; altitude – 46,97 m (Figura 1).

As variáveis meteorológicas horárias disponibilizadas foram: temperatura do ar (em °C, no instante, a máxima e a mínima); umidade relativa do ar (em %, no instante, a máxima e a mínima); temperatura do ponto de orvalho (em °C, no instante, a máxima e a mínima); pressão atmosférica (em hPa, no instante, a máxima e a mínima); velocidade do vento (em ms^{-1} , no instante e rajadas); direção do vento (em graus); radiação solar (em kJm^{-2}) e precipitação pluviométrica (em mm). Aqui, para se fazer uma análise relacionando dados meteorológicos com os de concentrações de poluentes, deve-se ter dados com a mesma dimensão de tempo. Como os dados de concentrações eram diários, sempre

referente às 16 horas, optou-se por médias diárias dos dados meteorológicos, por darem uma representatividade melhor das informações do dia, até às 16 horas, pois após este horário não teria influência nas concentrações do próprio dia, com exceção à direção do vento por ser uma variável qualitativa e à precipitação, onde foi utilizado o valor acumulado do dia, de zero às 16 horas.

A direção do vento é uma variável qualitativa, medida em graus (de 0 a 360°). Portanto, para a sua análise, fez-se uma transformação de seus valores em variável Dummy (Wilks, 2006), isto é, para cada direção do vento criou-se uma nova variável, e tendo a presença daquela direção a variável assume o valor 1, caso contrário valor 0. As direções do vento classificadas pelos respectivos graus está apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Direção do vento classificada pelos graus e o nome da variável com a presença daquela direção.

Direção	Variável	Graus
Norte	VN16	338 a 22
Nordeste	VNE16	23 a 67
Leste	VE16	68 a 112
Sudeste	VSE16	113 a 157
Sul	VS16	158 a 202
Sudoeste	VSO16	203 a 247
Oeste	VO16	248 a 292
Noroeste	VNO16	293 a 337

2.1 Ferramentas estatísticas

Para a análise dos dados, foram utilizadas as seguintes técnicas estatísticas (anexo 1):

- Estatísticas descritiva para informar as características das variáveis analisadas. Foram utilizados valores de média, desvio padrão, mínimo e máximo, bem como o uso de histogramas.
- Correlação linear de Pearson com o objetivo de encontrar correlação positiva ou negativa entre variáveis. Utilizou-se correlações entre cada poluente com os demais poluentes, para identificar relações entre eles.
- Análise de variância para identificar diferenças que possa haver entre os níveis de fatores analisados. Aqui fez-se uma análise envolvendo dois fatores, o primeiro referente aos meses, para identificar diferenças significativas entre os meses, e o segundo para identificar diferenças de concentrações de O₃ nos diferentes locais.
- Regressão linear múltipla para criar um modelo que indique quais as variáveis meteorológicas se relacionam com a concentração de material particulado (PM₁₀).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise descritiva dos dados

Os dados de análise descritiva são divididos em relação aos poluentes analisados no período de 2002 a 2006, fornecidos pela FEPAM, e em relação aos dados meteorológicos no período de 2005 e 2006, fornecidos pelo INMET.

3.1.1 Estatística descritiva dos poluentes de Porto Alegre

Para a análise dos dados fornecidos, em primeiro lugar, foi realizada uma análise descritiva dos mesmos, para uma boa compreensão do comportamento dos poluentes. Nas tabelas 4 a 6 são apresentadas as estatísticas descritivas das concentrações de poluentes para cada local e cada ano fornecido.

Observando as três tabelas (4 a 6), observa-se que no primeiro ano, 2002, a quantidade de dados para cada poluente é grande para todos eles, tendo valores em praticamente todos os dias do ano, mas nos demais anos tem-se uma quantidade razoável

para análise, apenas para o PM₁₀ e o O₃. Por esse motivo, o estudo desses dois poluentes será mais detalhado.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a Rodoviária de Porto Alegre, de 2002 a 2006.

RODOVIÁRIA	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
2002					
MÉDIA	33,32	12,69	26,45	3,05	14,54
DESVIO PADRÃO	15,10	12,45	14,04	3,13	10,28
MÁXIMO	132,78	47,76	73,52	20,59	66,05
DADOS	311	310	235	315	313
2003					
MÉDIA	33,51	1,83	25,07	6,54	12,09
DESVIO PADRÃO	17,23	2,90	11,78	5,93	9,11
MÁXIMO	122,44	20,54	54,72	31,33	71,59
DADOS	290	199	40	331	337
2004					
MÉDIA	41,45	0,94	39,39	5,02	9,19
DESVIO PADRÃO	20,83	1,06	22,64	4,64	4,79
MÁXIMO	132,96	3,34	92,41	26,16	26,96
DADOS	304	17	16	295	121
2005					
MÉDIA	44,93	2,17	37,34	6,17	8,35
DESVIO PADRÃO	22,01	1,75	8,94	4,54	2,01
MÁXIMO	137,74	6,62	52,83	27,52	12,46
DADOS	302	19	27	343	27
2006					
MÉDIA	41,42	0,35	39,60	18,96	
DESVIO PADRÃO	12,63	0,20	12,33	9,90	
MÁXIMO	73,01	1,59	72,45	60,41	
DADOS	160	319	92	339	

Fonte: FEPAM

Tabela 5 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a Escola de Bombeiros de Porto Alegre, de 2002 a 2006.

BOMBEIROS	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
2002					
MÉDIA	20,41	5,17	39,06	24,33	18,16
DESVIO PADRÃO	13,54	6,93	16,26	11,06	16,62
MÁXIMO	93,07	51,47	79,06	71,76	95,78
DADOS	310	340	266	343	240
2003					
MÉDIA	24,26	4,29	32,77	23,51	14,73
DESVIO PADRÃO	13,60	4,72	17,31	10,24	13,23
MÁXIMO	81,15	27,03	77,48	64,17	96,12
DADOS	306	309	96	357	346
2004					
MÉDIA	20,20	3,02	27,98	16,83	13,76
DESVIO PADRÃO	11,89	2,91	10,83	6,77	11,15
MÁXIMO	60,51	17,86	56,12	46,11	89,02
DADOS	294	244	25	355	252
2005					
MÉDIA	22,90	2,28		13,41	
DESVIO PADRÃO	15,31	3,64		7,43	
MÁXIMO	66,36	10,40		43,61	
DADOS	271	7		344	
2006					
MÉDIA	15,98		68,92	22,99	
DESVIO PADRÃO	11,01		21,62	10,14	
MÁXIMO	66,52		117,83	69,31	
DADOS	310		24	283	

Fonte: FEPAM

Pelas tabelas 4 a 6, pode-se analisar o comportamento de cada poluente separadamente. Para as concentrações de partículas inaláveis PM₁₀, verificou-se que as maiores médias anuais foram iguais a 44,9 µg m⁻³, para o local próximo à Rodoviária, 24,26 µg m⁻³, para o local próximo a Escola de Bombeiros, e 23,57 µg m⁻³, para o local junto a ESEF/UFRGS. Para os padrões nacionais de qualidade do ar, em nenhum dos locais ultrapassou os padrões primários e secundários, que são de 50 µg m⁻³. O valor máximo observado foi de 137,74 µg m⁻³, no local próximo a Rodoviária. Para os padrões de qualidade do ar, as concentrações de partículas inaláveis, medidas às 16 h diariamente, não ultrapassaram os padrões primários e secundários de 150 µg m⁻³.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas para cada poluente, no local próximo a ESEF – UFRGS em Porto Alegre, de 2002 a 2006.

ESEF	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
2002					
MÉDIA	13,63	1,13	20,73	25,39	9,98
DES PAD	10,66	1,30	10,41	13,72	8,71
MÁXIMO	46,81	7,26	68,37	96,63	45,93
DADOS	104	105	303	318	305
2003					
MÉDIA	9,65	1,56		26,36	10,42
DES PAD	5,48	1,45		11,85	10,60
MÁXIMO	31,67	6,83		71,40	73,14
DADOS	75	62		289	202
2004					
MÉDIA	23,57			23,02	9,10
DES PAD	14,15			10,45	6,99
MÁXIMO	72,46			62,03	45,05
DADOS	296			330	333
2005					
MÉDIA	21,89			28,02	9,43
DES PAD	14,03			12,92	6,51
MÁXIMO	85,68			102,06	45,49
DADOS	362			351	321
2006					
MÉDIA	22,69			23,71	
DES PAD	12,97			11,12	
MÁXIMO	68,27			69,07	
DADOS	242			346	

Fonte: FEPAM

Analisando o SO₂ (tabelas 4 a 6), no local próximo à Rodoviária, vê-se que a maior média anual de 12,69 µg m⁻³; próximo à Escola de Bombeiros, ela foi 5,17 µg m⁻³; junto a ESEF, a média foi 1,56 µg m⁻³. Esses valores, comparados com os padrões de qualidade do ar, ficam bem abaixo de 80 (primário) e 40 (secundário) µg m⁻³. O valor máximo observado foi 51,47 µg m⁻³, próximo à Escola de Bombeiros, ficando bem abaixo dos padrões nacionais de qualidade do ar, que são de 365 e 100 µg m⁻³, primários e secundários respectivamente.

Para o NO₂ (tabelas 4 a 6), para o local próximo à Rodoviária, a maior média ficou em 39,60 µg m⁻³. Próximo à Escola de Bombeiros, ela foi 68,92 µg m⁻³. Junto à ESEF a

maior média ficou em $20,73 \mu\text{g m}^{-3}$. Comparados com os padrões primários e secundários de qualidade do ar, de $100 \mu\text{g m}^{-3}$, todos ficaram abaixo desse valor. O valor máximo foi de $117,83 \mu\text{g m}^{-3}$, para o local próximo à Escola de Bombeiros. Para os padrões nacionais de qualidade do ar, as concentrações de NO_2 , medidas às 16 h diariamente, não ultrapassaram os padrões primários e secundários de 320 e $190 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente.

As concentrações de O_3 (tabelas 4 a 6), próximo à Rodoviária, a maior média anual foi $18,96 \mu\text{g m}^{-3}$; próximo à Escola de Bombeiros, ela foi $24,33 \mu\text{g m}^{-3}$; junto à ESEF, a maior média anual foi $28,02 \mu\text{g m}^{-3}$. O valor máximo foi de $102,06 \mu\text{g m}^{-3}$, no local junto a ESEF, local próximo ao jardim Botânico de Porto Alegre. Para os padrões nacionais de qualidade do ar, as concentrações de O_3 , medidas às 16 h diariamente, não ultrapassaram os padrões primários e secundários de $160 \mu\text{g m}^{-3}$.

Para as concentrações de CO (tabela 4 a 6), na Rodoviária, a maior média anual foi 14,54 ppm; nos Bombeiros, ela foi 18,16 ppm; na ESEF, a maior média anual foi 10,42 ppm. Pelos valores observados diariamente as 16 horas, observou-se um valor máximo de 96,12 ppm, junto à Escola de Bombeiros. Esses valores devem ser conseqüentes do tráfego intenso de veículos, e intensificado por fatores meteorológicos. Pelos padrões nacionais de qualidade do ar, as concentrações do CO, medidas diariamente às 16 horas, ultrapassaram os padrões primários e secundários em vários momentos nos três locais, sempre nos meses de maio a setembro, meses mais frios.

3.1.2 Estatística descritiva dos parâmetros meteorológicos

Os elementos meteorológicos são mostrados na tabela 7, onde observa-se características do clima de Porto Alegre: as temperaturas médias diárias até as 16 horas, apresentaram uma média próxima a 20°C , e uma variação de 6 a 29°C , representando clima quente com poucos meses de frio; as médias diárias da umidade relativa do ar, apresentou uma média de 77 %, e variação de 43 a 95 %, representando clima úmido; as

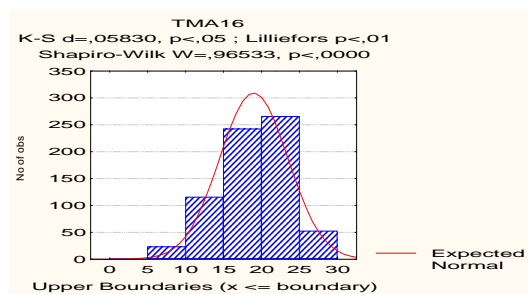
médias diárias da temperatura do ponto de orvalho resultou em uma média de 15 °C, variando de 1 a 23 °C; as médias diárias da velocidade do vento resultou na média de 1,38 m s⁻¹, representando 5 km h⁻¹, com uma variação que vai de 0,18 a 4,44 m s⁻¹, representando de 0,65 a 16 km h⁻¹, pelo histograma (figura 2e) verifica-se que o predomínio dos ventos vão em média até 3 m s⁻¹, equivalendo a 10,8 km h⁻¹, acima disso são poucas as ocorrências, indicando assim uma existência de pouca circulação de ar; as médias diárias da radiação solar, resultou em uma média de 535,96 kJ m⁻², com uma variação de 23 a 1108,24 kJ m⁻²; a precipitação pluviométrica diária, teve uma media de 2,31 mm, variando de 0 a 57,8 mm, com um predomínio maior de valores próximos de zero (figura 2g), indicando pouca chuva.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas para os elementos meteorológicos, para Porto Alegre, em 2005 e 2006.

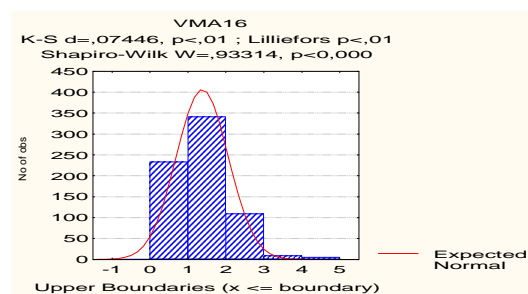
Variável	Unidade de medida	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Temp Média diárias até às 16h	°C	697	18,97	5,99	29,41	4,50
Umid. Relativa Média diária até às 16h	%	697	77,29	42,71	95,12	8,40
Ponto de Orvalho Méd diário até às 16h	°C	697	14,59	1,05	22,74	4,23
Pressão Atmosf. Média diária até às 16h	hPa	697	1010,52	996,41	1030,08	5,50
Veloc. Méd. diária do vento até às 16h	m s ⁻¹	697	1,38	0,18	4,44	0,68
Radiação Solar Média diária até às 16h	kJ m ⁻²	697	535,96	23	1108,24	297,21
Precipitação diária até às 16h	mm	697	2,31	0	57,8	7,35

Fonte: INMET

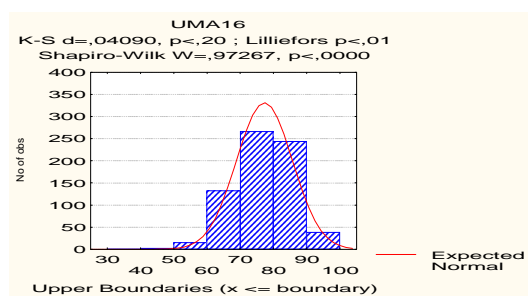
Nota: O N se refere aos 697 valores obtidos em cada variável em 730 dias, dos dois anos observados.



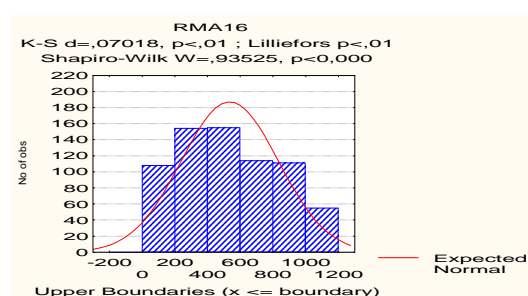
a) Temperatura média diária



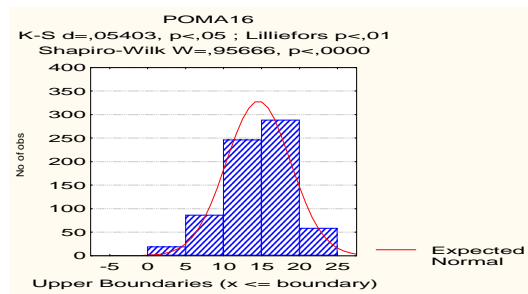
e) Velocidade média diária do vento



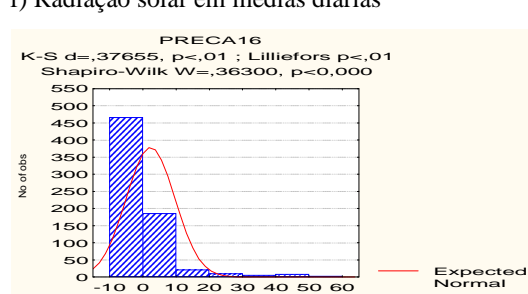
b) Umidade relativa do ar, médias diárias



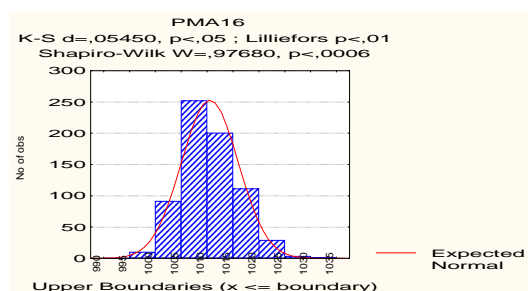
f) Radiação solar em médias diárias



c) Médias diárias da temperatura do ponto de orvalho



g) Precipitação diária



d) Pressão atmosférica em médias diárias

Fonte: INMET

Figura 2 - Histogramas das variáveis referentes aos elementos meteorológicos, referentes a dados médios diários, até às 16 horas, para Porto Alegre, para 2005 e 2006.

3.2 Análise da correlação dos poluentes

Para os 5 anos em que se tem dados das concentrações dos poluentes medidos diariamente às 16 horas, fez-se análise da correlação entre eles, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (anexo 1), para os três locais. Os resultados foram apresentados nas tabelas 8 a 10: a tabela 8 informa os resultados das correlações entre os poluentes, somente no local próximo à Rodoviária, a tabela 9 no local próximo à Escola de Bombeiros e a tabela 10 no local junto à Esef.

Tabela 8 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local próximo à Rodoviária, em Porto Alegre, RS.

	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
PM ₁₀	1	0,131	0,413	0,036-	0,659
SO ₂		1	0,221-	0,299-	0,502
NO ₂			1	0,32	0,222
O ₃				1	0,168-
CO					1

Fonte: FEPAM

Nota: Os valores em vermelho representam correlações significativas ao nível de significância de 5%.

Analisando o PM₁₀, as correlações significativas, ao nível de 5%, nos três locais, foram os seguintes poluentes: SO₂, NO₂ e CO, sendo todas positivas e a de maior grau com o CO, seguindo do NO₂, significando que quando as concentrações de PM₁₀ são altas, as concentrações destes poluentes também são altas. O O₃ não correlacionou significativamente em um dos locais e nos outros as correlações foram baixas.

Tabela 9 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local próximo à Escola de Bombeiros, em Porto Alegre, RS.

	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
PM ₁₀	1	0,207	0,438	-0,064	0,692
SO ₂		1	0,221	-0,143	0,333
NO ₂			1	0,012	0,421
O ₃				1	-0,161
CO					1

Fonte: FEPAM

Nota: Os valores em vermelho representam correlações significativas ao nível de significância de 5%.

Tabela 10 - Correlações entre as concentrações diárias dos poluentes, às 16 horas, de 2002 a 2006, no local junto à ESEF/UFRGS, em Porto Alegre, RS.

	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
PM ₁₀	1	0,28	0,333	0,122	0,413
SO ₂		1	0,01	0,032	0,307
NO ₂			1	0,089	0,171
O ₃				1	-0,068
CO					1

Fonte: FEPAM

Nota: Os valores em vermelho representam correlações significativas ao nível de significância de 5%.

Begun et al. (2009) realizaram determinações de PM₁₀ em diferentes ambientes da zona rural de Bangladesh. Nos resultados encontrados puderam concluir que a variação encontrada no material particulado estava relacionada a queima de combustível e dispersão dos poluentes, uma vez que os experimentos foram realizados em ambientes internos. Da mesma forma, em Porto Alegre a queima de combustível também é um fator relevante uma vez que há um grande tráfego nas regiões monitoradas. Assim, a correlação dos dados se dá principalmente por estes poluentes em grande parte serem oriundas de processos de queima de combustíveis.

Analisando os resultados das correlações entre o SO₂ e os demais poluentes, nos três locais, verificou-se que as correlações significativas, ao nível de 5%, foram com PM₁₀ e CO, positivas, sendo com o CO o maior valor.

Os resultados das correlações entre o NO₂ e os demais poluentes, nos três locais, resultaram em correlações positivas significativas, ao nível de 5%, foram com o PM₁₀ e CO, sendo os maiores valores para o PM₁₀.

Analisando os resultados das correlações entre o O₃ e os demais poluentes verifica-se que ele mostra correlação significativa, ao nível de 5%, nos três locais, apenas com o CO, sendo elas de grau baixo e negativo, isto é, quando o valor de O₃ é alto, o valor de CO é baixo, e vice versa o que é esperado uma vez que a fonte destes poluentes é diferente, conforme Shirmer e Lisboa (2008).

Os resultados das correlações entre o CO e os demais poluentes, nos três locais, mostrou correlação significativa, ao nível de 5%, com todos os demais poluentes, sendo as correlações positivas com o PM₁₀, SO₂ e NO₂ e negativas com o O₃. Os maiores graus de correlação ficaram com o PM₁₀, seguido de SO₂ e NO₂.

Em uma análise conjunta entre os poluentes, verifica-se uma forte relação entre as concentrações dos poluentes, com exceção do O₃. Todos eles provem da combustão, concluindo assim uma forte relação com o tráfego rodoviário que é intenso nos três locais analisados. O O₃, por ser um poluente que depende da radiação solar para a sua formação, não correlaciona diretamente com esses poluentes por esse motivo. Podemos ter dias com valores altos dos outros poluentes, mas com pouca radiação solar.

A correlação poderá ser positiva de ozônio com os outros poluentes provenientes de queima se houver a coincidência de uma estabilidade alta do ar atmosférico e alta radiação ultravioleta em uma região de parque, onde há emissão de carbono orgânico volátil (COV) e de alto tráfego. (Wilks, 2006; Räisänen et al., 2009).

3.3 Análise do ozônio troposférico

O ozônio (O_3), como visto anteriormente, não é emitido diretamente na atmosfera, mas forma-se através de reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e os compostos orgânicos voláteis (COVs). As maiores concentrações ocorrem em períodos de calor, tempo seco e em condições atmosféricas estagnantes (Räisänen et al., 2009; Shirmer e Lisboa, 2008).

Para uma análise mais detalhada do ozônio troposférico, procurou-se uma relação maior com os elementos meteorológicos, principalmente do vento e radiação solar. Para isso, realizou-se a regressão linear múltipla utilizando o O_3 , nos três locais, como variável dependente, e as demais variáveis meteorológicas como independentes. Esta análise serve para identificar quais os elementos meteorológicos podem estar influenciando, conjuntamente, na concentração do ozônio. As tabelas seguintes (11 a 13) mostram esses resultados nos três locais analisados.

Tabela 11 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a Rodoviária de Porto alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro padrão de BETA	B	Erro padrão de B	t(644)	Nível-p
Intercepto			16,6603	5,0363	3,3080	0,0010
Radiação	0,3103	0,0494	0,0097	0,0015	6,2878	0,0000
Velocidade do vento	0,1926	0,0351	2,8715	0,5234	5,4860	0,0000
Umidade relativa	-0,1663	0,0499	-0,1885	0,0566	-3,3314	0,0009
Precipitação	0,1209	0,0376	0,1528	0,0475	3,2149	0,0014

Regressão para a variável dependente: O_3 Rodoviária

$R = 0,4831$ $R^2 = 0,2334$ R^2 ajustado = 0,2286

$F(4,644) = 49,009$ $p < 0,00000$

Erro padrão da estimativa: 8,8860

Fonte: INMET e FEPAM

Tabela 12 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a Escola de Bombeiros, em Porto alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro padrão de BETA	B	Erro padrão de B	t(644)	Nível-p
Intercepto			-164,02	98,360	-1,668	0,0959
Radiação	0,309	0,052	0,010	0,002	5,927	0,0000
Velocidade vento	0,168	0,035	2,441	0,505	4,834	0,0000
Umidade	-0,220	0,048	-0,247	0,054	-4,546	0,0000
Temperatura	0,179	0,057	0,407	0,129	3,144	0,0017
Precipitação	0,093	0,038	0,119	0,048	2,476	0,0136
Pressão	0,099	0,052	0,182	0,095	1,909	0,0567

Regressão para a variável dependente: O3Bomberos

R= 0,5794 R²= 0,3357 R² ajustado= 0,3290

F(4,644)=49,614 p<,00000

Erro padrão da estimativa: 8,2822

Fonte: INMET e FEPAM

Tabela 13 - Análise de regressão linear múltipla para o ozônio, observado no local próximo a ESEF (UFRGS), em Porto alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro padrão de BETA	B	Erro padrão de B	t(644)	Nível-p
Intercepto			14,9853	2,1361	7,0153	0,0000
Radiação	0,1920	0,0540	0,0072	0,0020	3,5532	0,0004
Velocidade vento	-0,1801	0,0351	-3,2491	0,6328	-5,1345	0,0000
Temperatura	0,5103	0,1153	1,3662	0,3088	4,4250	0,0000
Ponto orvalho	-0,3517	0,1024	-1,0212	0,2973	-3,4354	0,0006

Regressão para a variável dependente: O3Esef

R= 0,4432 R²= 0,1965 R² ajustado= 0,1916

F(4,644)=40,342 p<,00000

Erro padrão da estimativa: 11,024

Fonte: INMET e FEPAM

Analisando os resultados das análises de regressão, verifica-se que nos três locais os modelos tiveram uma explicação da variável dependente (O₃), pelo R² ajustado, entre 19 e 33%, consideradas pequenas. Não houve um padrão nos resultados. O que se pode observar, sendo comum nos três locais, é a relação positiva com a radiação solar, esperada para a formação de ozônio na troposfera.

Fez-se, também, a correlação entre os elementos meteorológicos e o O₃, nos três locais (tabela 14). As correlações nos permitem analisar cada variável individualmente, e podemos concluir que as variáveis com correlações mais fortes e presentes nos três locais é a umidade relativa do ar (correlações negativas) e radiação solar (correlações positivas), indicando baixa umidade e maior presença de radiação solar contribuindo para maiores concentrações de O₃. Supõe-se que o aumento da umidade relativa do ar promove a filtração da radiação e assim, menos radiação ultravioleta chega até a superfície, para ser utilizada nas reações fotoquímicas de formação de ozônio.

Tabela 14 - Correlação linear de Pearson entre as concentrações diárias de O₃, 16 horas, nos três locais e as variáveis meteorológicas, para Porto Alegre, de 2005 a 2006.

	O ₃ R	O ₃ B	O ₃ E
Temp Média diárias	0,0146 p=0,733	0,2559 p=0,000	0,2934 p=0,000
Umid. Média diária	-0,2307 p=0,000	-0,4066 p=0,000	-0,3232 p=0,000
Pto de Orv. Méd diário	-0,0803 p=0,060	0,0863 p=0,044	0,149 p=0,000
Pressão Média diária	-0,0112 p=0,794	-0,1082 p=0,011	-0,1181 p=0,006
Veloc. Méd. diária do vento	0,2062 p=0,000	0,1137 p=0,008	-0,1001 p=0,019
Radiação Média diária	0,2933 p=0,000	0,4515 p=0,000	0,3997 p=0,000
Precipitação diária	-0,0459 p=0,284	-0,1233 p=0,004	-0,1343 p=0,002

Fonte: INMET

Em seguida, fez-se uma análise de variância para as médias mensais de concentrações de O₃, medido diariamente às 16 horas, considerando os meses e os locais

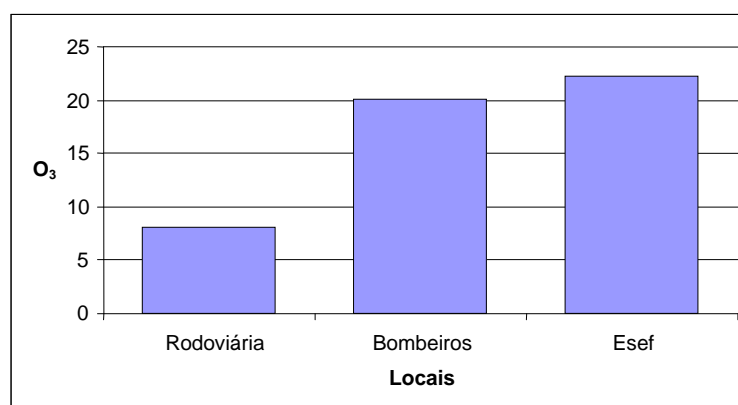
como fatores. Esta análise envolve dois fatores, o primeiro referente aos meses e o segundo aos locais das concentrações de O₃. O objetivo dela é identificar diferenças que possam haver dentro dos níveis de cada fator. A tabela 15 mostra o resultado da análise de variância indicando que há diferenças significativas entre os meses e que há diferenças altamente significativas entre os locais.

Tabela 15 - Análise de variância para os fatores mês e local, das médias mensais da concentração de O₃, para Porto Alegre, de 2002 a 2006.

	GI	QM	GI	QM		
	Efeito	Efeito	Erro	Erro	F	Nível-p
Mês	11	127,26	45	58,86	2,16	0,03
Local	2	3712,68	90	45,17	82,19	0,00
Residuo	22	25,84	90	45,17	0,57	0,93

Fonte: FEPAM

Analisando as médias mensais das concentrações de O₃ às 16h, nos três locais, mostrados na figura 3, observa-se visivelmente que no local próximo a Rodoviária, a média é muito inferior, comparado com os outros locais. Comprova-se isso na tabela 16, onde é apresentado o teste LSD de diferença de médias, onde o local próximo a Rodoviária diferencia dos demais. Os locais com maiores médias são próximo à Escola de Bombeiros e próximo à ESEF no Jardim Botânico. Os três locais apresentam um intenso tráfego de veículos, mas os dois últimos são locais que apresentam maior quantidade de vegetação, conseqüentemente maior quantidade de oxigênio, ocasionando maior produção de ozônio, isto é, maiores concentrações (Friedrich, 2009).



Fonte: FEPAM

Figura 3 - Concentrações médias mensais de O₃, para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006.

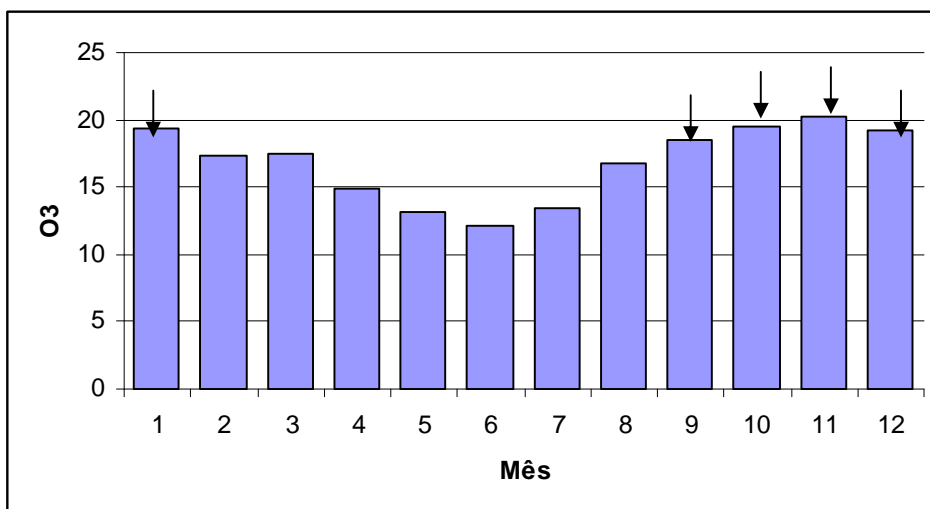
Tabela 16 - Valores das concentrações médias mensais de O₃, nos locais observados, para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006, considerando as diferenças entre as médias pelo teste LSD de diferença de médias a 5%.

Locais	Média	
Rodoviária	7,47	a
Bombeiros	20,30	b
Esef	22,47	b

Fonte: FEPAM

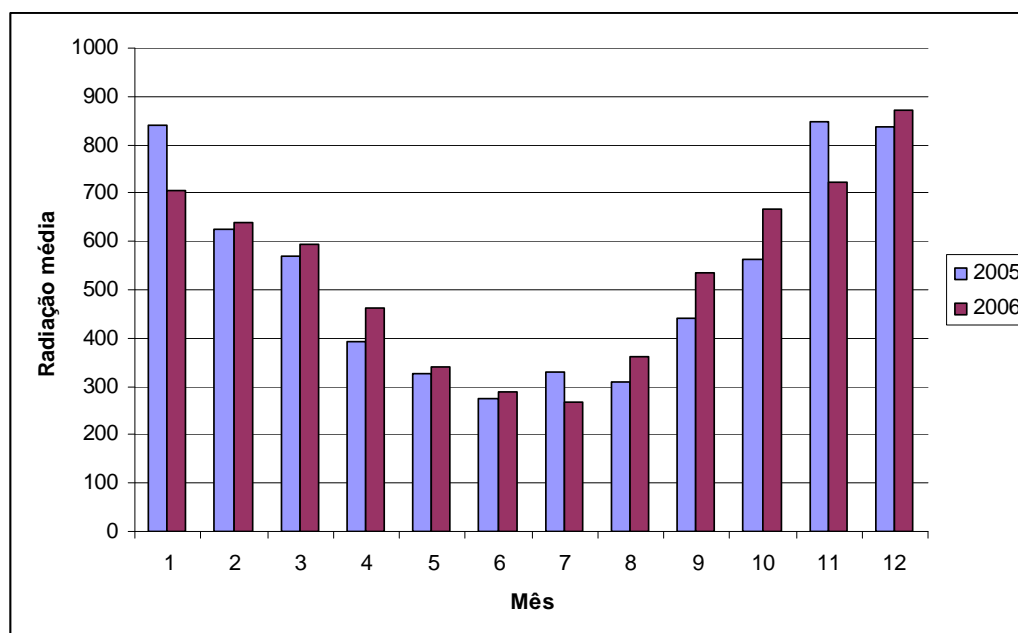
Nota: Locais com letras iguais não diferem entre si.

Analisando as médias mensais das concentrações de O₃ às 16h, nos 12 meses do ano, mostrados na figura 4, observa-se que nos meses de setembro a janeiro, as médias assumem maiores valores. Estes resultados estão, também, na tabela 17, onde é apresentado o teste LSD de diferença de médias. Um dos fatores que favorecem maiores concentrações de O₃, além da presença de outros poluentes, na atmosfera é a radiação solar, como havia sido observado anteriormente. Médias mensais de radiação solar referentes a 2005 e 2006 são apresentados na figura 5. Nela, verifica-se visivelmente uma grande relação entre a radiação solar e as concentrações de ozônio, nos meses com maiores incidências de radiação solar apresentam maiores concentrações de O₃.



Fonte: FEPAM

Figura 4 - Concentrações médias mensais de O₃, nos três locais em conjunto, em Porto Alegre de 2002 a 2006



Fonte: INMET

Figura 5 - Radiação solar média mensal, de 0 às 16 horas, para Porto Alegre, em 2005 e 2006.

Tabela 17 - Valores das concentrações médias mensais de O₃, para Porto Alegre nos anos de 2002 a 2006, considerando as diferenças entre as médias pelo teste LSD de diferença de médias a 5%.

Mês	média	
6	12,18	a
5	13,21	a
7	13,46	a
4	14,84	ab
3	15,77	abc
2	16,35	abc
8	16,70	abc
9	18,47	bc
12	19,15	bc
1	19,32	bc
10	19,57	bc
11	21,91	c

Fonte: FEPAM

Nota: Locais com letras iguais não diferem entre si.

3.4 *Análise das partículas inaláveis*

As partículas inaláveis analisadas compreendem partículas de tamanho inferior ou igual a 10 µm (PM₁₀). Sua composição e tamanho dependem da fonte de emissão, mas, em geral, são constituídas por componentes múltiplos, tais como: sulfatos, sais, metais, partículas de carbono, sílica finamente dividida e outros (Saitoh et al., 2002). Suas concentrações são medidas em relação à massa total concentrada de material particulado (µg m⁻³). Além da medição dos poluentes, o monitoramento do ar deve contemplar o levantamento de dados meteorológicos permitindo, assim, compreender a dispersão de poluentes em uma determinada região.

Para analisar o comportamento das partículas inaláveis com relação aos elementos meteorológicos, fez-se a análise de regressão múltipla para cada local de coleta das

partículas inaláveis, considerando as concentrações de partículas inaláveis como variável dependente e os elementos meteorológicos como variáveis independentes.

A tabela 18 apresenta o resultado da análise de regressão múltipla para o local próximo à rodoviária. O ajustamento teve uma explicação significativa (51%). Os valores de Beta medem a inclinação, estimando o aumento, ou decréscimo, nos valores da variável de período a período. As variáveis que apresentaram maiores contribuições ao modelo são as que apresentam maiores valores de Beta, independente do sinal, são: a temperatura média diária, com relação positiva e a temperatura média do ponto de orvalho com relação negativa. Contribuem também, a velocidade média do vento e a radiação solar, com relação negativa e a direção do vento, norte e noroeste, com relações positivas.

Tabela 18 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 μ m, observadas no local próximo à Rodoviária, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro Padrão de BETA	B	Erro padrão de B	t(433)	Nível-p
Intercepto			37,4243	3,5611	10,5093	0,0000
temperatura	1,0448	0,1187	4,8429	0,5501	8,8030	0,0000
ponto orvalho	-0,7872	0,1105	-3,7438	0,5256	-7,1234	0,0000
velocidade vento	-0,4855	0,0351	-13,7409	0,9927	-13,8424	0,0000
vento norte	0,2052	0,0352	14,8754	2,5495	5,8348	0,0000
vento noroeste	0,1511	0,0350	9,7500	2,2584	4,3173	0,0000
radiação	-0,3823	0,0506	-0,0259	0,0034	-7,5555	0,0000

Regressão para a variável dependente: PM10R

R= 0,7154 R²= 0,5117 R² ajustado= 0,5050

F(6,433)=75,636 p<0,0000

Erro padrão da estimativa: 13,634

Fonte:INMET e FEPAM

A tabela 19 apresenta o resultado da análise de regressão múltipla para o local próximo à Escola de Bombeiros. O ajustamento teve uma explicação significativa (37%). As variáveis que apresentaram maiores contribuições, verificadas pelos valores de beta e, também, pelo nível p, apresentados na tabela, foram: a temperatura média diária, com relação positiva, a temperatura média do ponto de orvalho, com relação negativa, a umidade relativa do ar média, com relação positiva, a radiação solar e a velocidade média

do vento, ambas com relações negativas. Sendo a temperatura e o ponto de orvalho as mais importantes.

Tabela 19 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 µm, observadas no local próximo à Escola de Bombeiros, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro Padrão de BETA	B	Erro Padrão de B	t(547)	Nível-p
Intercepto			-318,7464	54,4465	-5,8543	0,0000
temperatura	6,0749	0,8675	18,1904	2,5974	7,0032	0,0000
umidade	2,1455	0,3394	3,6488	0,5772	6,3213	0,0000
ponto orvalho	-5,8219	0,8436	-18,4711	2,6766	-6,9010	0,0000
velocidade vento	-0,3079	0,0364	-6,0440	0,7143	-8,4619	0,0000
vento norte	0,1807	0,0350	10,0899	1,9549	5,1614	0,0000
vento noroeste	0,1584	0,0355	6,7744	1,5182	4,4623	0,0000
radiação	-0,4847	0,0523	-0,0230	0,0025	-9,2663	0,0000
precipitação	-0,1221	0,0385	-0,2471	0,0780	-3,1692	0,0016

Regressão para a variável dependente: PM10B

R= 0,6188 R²= 0,3829 R² ajustado= 0,3739

F(8,547)=42,430 p<0,0000

Erro padrão da estimativa: 10,881

Fonte: INMET e FEPAM

A tabela 20 apresenta o resultado da análise de regressão múltipla para o local próximo à Escola de Bombeiros. O ajustamento teve uma explicação significativa (31%). As variáveis que apresentaram maiores contribuições foram: a temperatura média diária, com relação positiva, a temperatura média do ponto de orvalho, com relação negativa.

O que se observa nas regressões anteriores é que, em todas elas, tem-se a temperatura média diária até as 16 h com relação positiva, indicando que quanto maior a temperatura do ar, maiores serão as concentrações de PM10, também se tem as temperaturas médias diárias, até as 16 horas, do ponto de orvalho, a velocidade média diária do vento, até as 16 horas, e a radiação média diária, até as 16 horas, com relações negativas, indicando que quanto menor a temperatura do ponto de orvalho, menor velocidade do vento e menor radiação solar, maiores serão as concentrações de PM10. Os

fatores que contribuem para maiores concentrações de PM10 são os dias quentes, com pouco vento e nublado, ou seja, quando a estabilidade do ar é alta.

Tabela 20 - Análise de regressão múltipla para as partículas inaláveis inferiores a 10 µm, observadas no local próximo à ESEF (UFRGS), em Porto Alegre, em 2005 e 2006.

	BETA	Erro padrão de BETA	B	Erro padrão de B	t(566)	Nível-p
Intercepto			21,7303	2,3806	9,1279	0,0000
temperatura	1,1195	0,1120	3,3111	0,3312	9,9987	0,0000
ponto orv	-0,8885	0,1039	-2,7563	0,3223	-8,5527	0,0000
vel vento	-0,4258	0,0348	-8,3178	0,6807	-12,2196	0,0000
radiação	-0,4523	0,0495	-0,0197	0,0022	-9,1396	0,0000

Regressão para a variável dependente: PM10E

R= 0,5633 R²= 0,3173 R² ajustado= 0,3124

F(4,566)=65,754 p<,00000

Erro padrão da estimativa: 11,075

Fonte:INMET e FEPAM

Este resultado vem ao encontro do que Sales (2007) escreveu indicando que os principais fatores que podem influenciar nas concentrações de poluentes são: o vento, a estabilidade atmosférica e a precipitação.

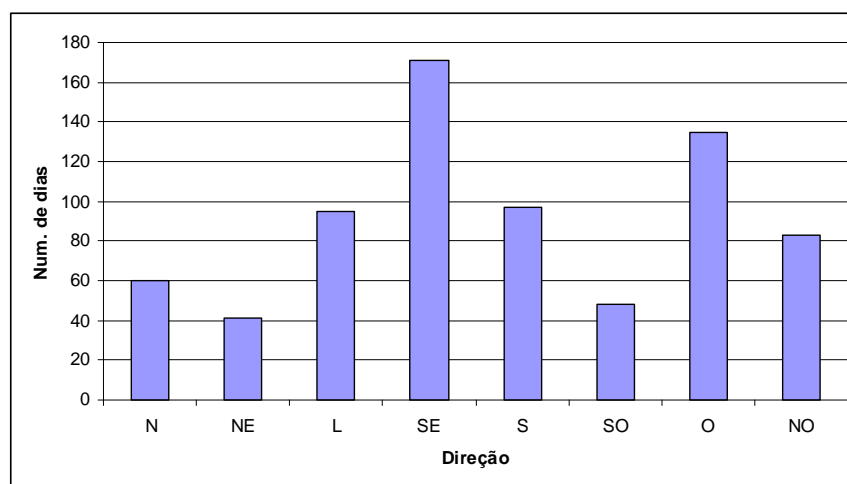
Nos modelos acima, observa-se uma contribuição para maiores concentrações de PM10, da direção do vento Norte e Noroeste, na estação próxima a Rodoviária e Escola de Bombeiros. Aqui, constata-se que estas direções de ventos podem estar sendo afetadas pela concentração de edificações da Região Metropolitana de Porto Alegre, conforme aborda Moreira (2004).

3.5 Análise da direção dos ventos

A direção dos ventos tem um papel importante na concentração dos poluentes, pois leva em consideração a estrutura topográfica da cidade e a concentração de prédios e da população.

Como visto anteriormente, o vento é um dos principais fatores meteorológicos que condicionam a qualidade do ar e a estrutura urbana tem uma importante influência sobre o campo de vento. Sua velocidade, em geral, diminui com o atrito produzido pela superfície (edifícios de uma área urbana colocam resistência ao fluxo do vento em relação à área rural) e a direção é forçada pela estrutura viária.

A figura 6 mostra a freqüência com que cada uma das direções do vento, ocorreram diariamente às 16 horas, nos anos de 2005 e 2006. Nela, observa-se que a direção predominante é a sudeste, seguida pela direção oeste.



Fonte: INMET

Figura 6 - Freqüência com que o vento ocorre nas devidas direções, diariamente às 16 horas, em Porto Alegre em 2005 e 2006.

A direção do vento é uma variável qualitativa, medida em graus (de 0 a 360°), onde fez-se uma transformação de seus valores em variável Dummy (Wilks, 2006), isto é, para cada direção do vento criou-se uma nova variável, e tendo a presença daquela direção a variável assume o valor 1, caso contrário valor 0, conforme mostrado anteriormente (tabela 3).

Tabela 21 - Correlações entre Partículas inaláveis e a direção dos ventos (variável dummy) às 16 horas, em Porto Alegre, em 2005 e 2006.

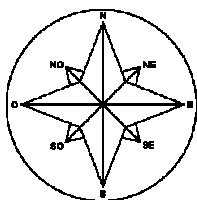
	PM10R	PM10B	PM10E
norte	0,3079 p=0,000	0,2789 p=0,000	0,2567 p=0,000
nordeste	0,0668 p=0,215	0,0085 p=0,875	0,0489 p=0,365
leste	-0,1877 p=0,000	-0,1881 p=0,000	-0,148 p=0,006
sudeste	-0,141 p=0,009	-0,1575 p=0,003	-0,1328 p=0,013
sul	-0,0819 p=0,128	-0,0562 p=0,298	-0,0695 p=0,197
sudoeste	-0,0837 p=0,120	-0,098 p=0,069	-0,0794 p=0,140
oeste	-0,0633 p=0,240	-0,0293 p=0,587	-0,0539 p=0,318
noroeste	0,2901 p=0,000	0,3281 p=0,000	0,2688 p=0,000

N=346

Fonte: INMET e FEPAM

Para analisar a influência da direção dos ventos na concentração dos poluentes foi feita uma análise de correlação entre as direções às 16 horas e as concentrações, também medidas às 16 horas (tabela 21). Nesta tabela verifica-se que as direções que contribuem significativamente para o aumento das concentrações são Norte e Noroeste. As direções

dos ventos que contribuem significativamente para diminuir as concentrações nos locais medidos são Leste e Sudeste.

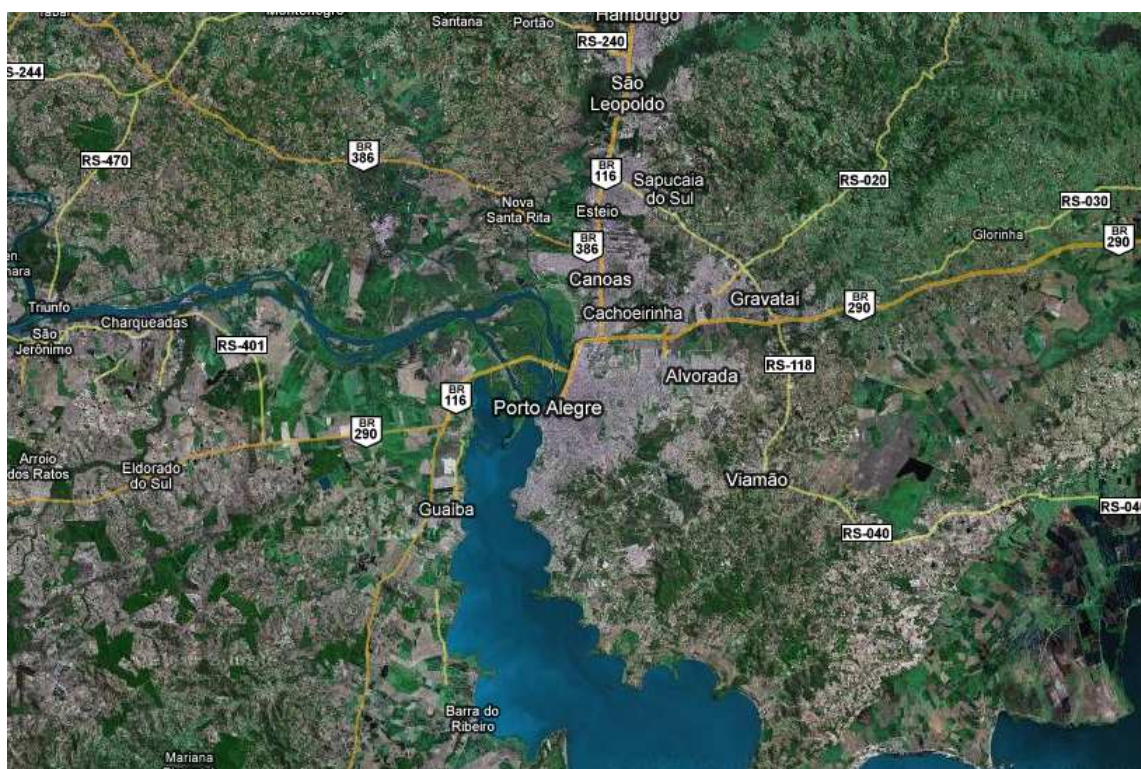


Fonte: <http://maps.google.com.br/maps>

Figura 7 - Localização das Estações Automáticas de monitoramento do ar da Fepam (em vermelho) e Estação de superfície Automática do Inmet (em azul), na cidade de Porto Alegre.

A figura 7 mostra as localizações das estações automáticas de monitoramento do ar e meteorológica. No mapa podemos verificar que os ventos que contribuem para o aumento das concentrações vem do norte e noroeste em direção ao sul e sudeste. Esses ventos vem de áreas industriais e com fluxo intenso de veículos. Já os ventos que vem do Leste e

Sudeste contribuem para a dispersão ou diminuição das concentrações dos poluentes. Na figura 8, pode-se verificar o mapa de Porto Alegre em uma escala menor e, portanto, a procedência dos ventos, onde se observa que os ventos que contribuem para um aumento nas concentrações (norte e noroeste) correspondem a regiões muito industrializadas.



Fonte: http://www.worldmapfinder.com/Map_EarthMap.php?ID=/Pt/South_America/Brazil/Porto_Alegre

Figura 8 - Mapa da Região Metropolitana de Porto Alegre.

CONCLUSÕES

Neste trabalho pode-se concluir que:

1. Para os padrões nacionais de qualidade do ar, estabelecidos pela Resolução nº 03 de 1990 do CONAMA (tabela 2), as concentrações dos poluentes: PM₁₀, SO₂, NO₂, e O₃, medidos às 16h diariamente, não ultrapassaram os padrões primários, que podem afetar à saúde humana se ultrapassados, e secundários, causam mínimos efeitos à saúde humana se ultrapassados. O poluente CO ultrapassou os padrões primários e secundários em vários momentos, sempre observados nos meses de frio, que vão de maio à setembro.
2. As médias aritméticas anuais de concentrações de partículas inaláveis não ultrapassaram os padrões nacionais de qualidade do ar, primários e secundários, de 50 µg m⁻³. As médias anuais de SO₂ também não ultrapassaram os padrões nacionais primários e secundários de 80 e 40 µg m⁻³. Para as concentrações de NO₂, pelos padrões de qualidade do ar, as médias anuais de concentrações ficaram bem abaixo de 100 µg m⁻³.
3. As maiores médias mensais das concentrações de O₃, às 16 h, foram observadas nos meses de setembro a janeiro. Os fatores meteorológicos mais influentes são a baixa umidade relativa do ar e a presença de radiação solar.

4. Pela regressão múltipla, nos três locais com estações de monitoramento, os elementos meteorológicos que influenciam nas concentrações de Partículas Inaláveis (PM_{10}) são: a temperatura média diária até as 16 h com relação positiva; as temperaturas médias diárias, até as 16 horas, do ponto de orvalho, a velocidade média diária do vento, até as 16 horas, e a radiação média diária, até as 16 horas, com relações negativas. Logo, os fatores que contribuem para maiores concentrações de PM_{10} são os dias quentes com pouco vento e nublado.
5. As direções do vento que contribuem significativamente para o aumento das concentrações de partículas inaláveis são Norte e Noroeste, correspondendo a uma região bastante industrial e com fluxo intenso de veículos. As direções dos ventos que contribuem significativamente para diminuir as concentrações nos locais medidos são Leste e Sudeste.

Portanto, para as concentrações de partículas inaláveis, servem de alerta os dias que são quentes com pouco vento e nublado. Também, os dias em que a direção do vento é norte e noroeste. Para o ozônio, o alerta é para os meses de setembro a janeiro, onde apresentaram maiores concentrações, com dias com baixa umidade relativa do ar e ensolarados.

Assim, com estas informações que correlacionam os poluentes atmosféricos entre si e com as condições atmosféricas é possível que a cidade de Porto Alegre possa definir ações e alterar o seu plano diretor objetivando a redução da poluição atmosférica na região urbana.

TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listados outros trabalhos que possam ser realizados:

- avaliação do plano diretor de Porto Alegre visando redução do impacto causado por emissões atmosféricas;
- implantar programas de biomonitoramento em outras partes do município que permitam avaliar a qualidade do ar nas áreas residenciais e industriais;
- avaliar os dados de poluição atmosférica de Porto Alegre incluindo os anos de 2007 e 2008;
- empregar outras ferramentas estatísticas como regressão não-linear, regressão stepwise e técnicas não-paramétricas para analisar a relação entre as concentrações de poluentes com as variáveis meteorológicas, considerando a concentração do dia anterior em algum modelo.

REFERÊNCIAS

BAILEY, D.; SOLOMON, G. Pollution prevention at ports: clearing the air. *Environmental Impact Assessment Review*. V. 24, n. 7-8, out-nov. 2004, p. 749-774.

BARRETO, S. M. A atmosfera. In: ZURITA, M. L. L.(Org.); TOLFO, A. M. (Org.). *A Qualidade do Ar em Porto Alegre*. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. 92p.

BEGUM, B. A.; PAUL, S. K.; HOSSAIN, M. D.; BISWAS, S. K.; HOPKE, P. K. Indoor air pollution from particulate matter emissions in different households in rural areas of Bangladesh. *Building and Environment*. V. 44, 2009. p. 898–903.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. *Poluição do ar*. São Paulo: Moderna, 1997. 83p.

BRANIS, M.; SAFRANEK, J.; HYTYCHOVA, A. Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environment*. V. 44, n. 6, June 2009, Pages 1246-1252.

CHELANI, A. B.; Statistical persistence analysis of hourly ground level ozone concentrations in Delhi. *Atmospheric Research*. V. 92, 2009, p. 244–250.

COGLIANI, E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables. *Atmospheric Environment*. V. 35, 2001. p. 2871-2877.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Apresenta informações sobre as resoluções referentes a qualidade do ar. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/>>.

DERISIO, J. C. *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. São Paulo: CETESB, 1992. 201 p.

FEEMA. Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. Apresenta informações sobre a qualidade do ar. Disponível em: <www.feema.rj.gov.br?qualidade-ar.asp?cat=65>. Acesso em 26/03/2007.

FRIEDRICH, R. Natural and biogenic emissions of environmentally relevant atmospheric trace constituents in Europe. *Atmospheric Environment*. V. 43, 2009. p. 1377–1379.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL – FEPAM. *Relatório da Qualidade do ar 2001-2002*. Porto Alegre, 2002. 72 p.

GLEN, W. G.; ZELENKA, M. P.; GRAHAM, R. C. Relating Meteorological Variables And Trends In Motor Vehicle Emissions To Monthly Urban Carbon Monoxide Concentrations. *Atmospheric Environment*. Vol. 30, No. 24, p. 4225-4232, 1996.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Apresenta informações sobre as estações meteorológicas. Disponível em <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 05/12/2007.

LADJI, R.; YASSAA, N.; BALDUCCI, C.; CECINATO, A.; MEKLATI, B. Y. Annual variation of particulate organic compounds in PM10 in the urban atmosphere of Algiers. *Atmospheric Research*. V. 92, 2009. P. 258–269.

LOPEZ-GAMERO, M. D.; CLAVER-CORTES, E.; MOLINA-AZORIN, J. F. Evaluating environmental regulation in Spain using process control and preventive techniques. *European Journal of Operational Research*. V. 195, 2009, p. 497–518.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. *Ambiente & Sociedade*. Vol. VII n°2, jul/dez 2004. p.159-171.

MOZETO, A. A. Química Atmosférica: a química sobre nossas cabeças. *Química Nova na Escola*, São Paulo, SP, n. fev/2001, p. 41-49, 2001.

NETO, J.; TORRES, P. M.; FERREIRA, F. Previsão da qualidade do ar para Lisboa – A abordagem estatística. In: 8ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE AMBIENTE, 2004. <http://www.prevqualar.org/docs/200409_%20FCTUNL_8aConf.Nac.Amb._paper.pdf>

NETO, J. et al. Previsão da qualidade do ar para Lisboa por métodos estatísticos. In: 6º SEMINÁRIO LUSO-ESPANHOL DE METEOROLOGIA, 2005. <http://www.prevqualar.org/docs/200504_APMG_Sesimbra_Previsao_QA.pdf>

RÄISÄNEN, T.; RYYPÖ, A.; KELLOMÄKI, S. Monoterpene emission of a boreal Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Forest. *Agricultural and forest meteorology*. V. 149, 2009. p. 808 – 819.

SAITOH, K., SERA, K., HIRANO, K., SHIRAI, T. Chemical characterization of particles in winter-night smog in Tokyo. *Atmospheric Environment*. V. 36, 2002. P. 435–440.

SALES, J. A. Os poluentes do ar e os aspectos meteorológicos. MMA. *Ministério do Meio Ambiente*. Disponível em:

<www.meioambiente.gov.br/port/sqa/atmosfera/index.cfm?submenu=4#>. Acesso em 05/2007.

SANTOS, J. M.; GRIFFITHS, R. F.; REIS, Jr., N. C.; MAVROIDIS, I. Experimental investigation of averaging time effects on building influenced atmospheric dispersion under different meteorological stability conditions. *Building and Environment*. V. 44, 2009, p. 1295–1305.

SEAMAN, N. L. Meteorological modeling for air-quality assessments. *Atmospheric Environment*. V. 34, 2000. p. 2231-2259.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE – SMAM. A poluição atmosférica. In: ZURITA, M. L. L.(Org.); TOLFO, A. M. (Org.). *A Qualidade do Ar em Porto Alegre*. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. 92p.

SCHIRMER, W. N. ; LISBOA, Henrique de Melo . Química da atmosfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. *Tecno-Lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 12, n. 2, p. 37-46, jul;dez. 2008.

SHIVELY, T. S.; SAGER, T. W. Semiparametric Regression Approach to Adjusting for Meteorological Variables in Air Pollution Trends. *Environmental Science & Technology*. V. 33, 1999, p. 3873-3880.

SHRESTHAS, R. M.; MALLA, S. Air Pollution From Energy Use In A Developing Country City: The Case Of Kathmandu Valley, Nepal. *Energy*. Vol. 21, No. 9. 1996. p. 785-194.

SILVA, C.; QUIROZ, A. Optimization of the atmospheric pollution monitoring network at Santiago de Chile. *Atmospheric Environment*. V. 37, 2003. p. 2337–2345.

SOLBERG, S.; DOBBERTIN, M.; REINDS, G. J.; LANGE, H.; ANDREASSEN, K.; FERNANDEZ, P. G.; HILDINGSSON, A.; VRIES, W. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*. 2008.

SULLIVAN, R. C.; PRATHER, K. A. Recent Advances in Our Understanding of Atmospheric Chemistry and Climate Made Possible by On-Line Aerosol Analysis Instrumentation. *Analytical Chemistry*. V. 77 (12), 2005. P. 3861-3886.

TORRES, F. T. P., MARTINS, L. A. Fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG). *Caminhos de Geografia – Revista on line*. V. 4 (16), p. 23 – 39, out/2005. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em 11/2007.

WANG, W. C.; CHEN, K. S.; WANG, S. K.; LEE, H. C.; TSAI, M. Y. Modeling atmospheric PM10 concentrations during severe pollution events in southern Taiwan. *Atmospheric Research*. V. 92, 2009, p. 159–171.

WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2 ed. Elsevier, 2006, 626 p.

YORKS, J. E.; THOMPSON, A. M.; JOSEPH, E.; MILLER, S. K. The variability of free tropospheric ozone over Beltsville, Maryland (39N, 77W) in the summers 2004–2007. *Atmospheric Environment*. V. 43, 2009. P. 1827–1838.

ZIOMAS, I. C.; MELAS, D.; ZEREFOS, C. S.; BAIS, A. F.; PALIATSOS, A. G. Forecasting Peak Pollutant Levels From Meteorological Variables. *Atmospheric Environment*. Vol. 29, No. 24, p. 3703–3711, 1995.

ANEXO 1 - TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

Estatísticas descritivas:

- Média Aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

onde:

x_i representa os valores das variáveis analisada
 n representa a quantidade de valores da variável

- Mínimo

Representa o menor valor do conjunto de dados

- Máximo

Representa o maior valor do conjunto de dados

- Desvio Padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

onde:

x_i representa os valores das variáveis analisada
 n representa a quantidade de valores da variável
 \bar{x} representa a média aritmética da variável

Correlação Linear de Pearson:

$$r = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

onde:

x_i representa os valores de uma das variáveis analisada

y_i representa os valores de outra variáveis analisada

n representa a quantidade de valores da variável

O objetivo da análise da correlação, entre duas variáveis, é encontrar uma correlação positiva ou negativa entre elas. Os valores para r podem variar de -1 a $+1$. Quando o valor de r for próximo de -1 , diz-se que existe correlação negativa entre as variáveis, isto é, a medida que os valores de x aumentam, os valores de y diminuem. Quando o valor de r for próximo de $+1$, diz-se que existe correlação positiva entre as variáveis, isto é, a medida que os valores de x aumentam, os valores de y também aumentam. Quando o valor de r for próximo de zero, diz-se que não existe correlação. Para decidir se o valor de r se aproxima de -1 ou de $+1$ o suficiente para dizer se existe correlação, utiliza-se o teste de significância, onde se define o nível de significância em que a correlação é significativa. Se este valor for menor que $0,05$ diz-se que a correlação é significativa.

Análise de variância:

A análise de variância utilizada envolve dois fatores, o primeiro referente aos meses e o segundo aos locais das concentrações de O_3 . O objetivo desta análise é identificar diferenças que possa haver dentro dos níveis de cada fator. A análise é realizada com o auxílio do quadro de análise de variância, onde se devem especificar as seguintes fórmulas:

Fator 1 (F1)

Fator 2 (F2)

Resíduo (RES)

Graus de liberdade (GL)

Quadrado Médio (QM)

$GL_{F1} = a - 1$, onde a é o número de níveis do Fator 1

$GL_{F2} = b - 1$, onde b é o número de níveis do Fator 2

$GL_{RES} = (a - 1) \cdot (b - 1)$

$$QM_{F1} = \frac{b \cdot \sum_{j=1}^a (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{a - 1}$$

$$QM_{F2} = \frac{a \cdot \sum_{k=1}^b (\bar{x}_k - \bar{x})^2}{b - 1}$$

$$QM_{RES} = \frac{\sum_{j,k} (x_{jk} - \bar{x})^2 - \sum_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 - \sum_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2}{(a - 1) \cdot (b - 1)}$$

A estatística utilizada é a F calculada da seguinte forma:

$$F_{F1} = \frac{QM_{F1}}{QM_{RES}}$$

$$F_{F2} = \frac{QM_{F2}}{QM_{RES}}$$

As hipóteses estatísticas em que estão sendo testadas são as seguintes:

H₀: Não há diferença entre as médias dos níveis do Fator analisado

H₁: Pelo menos duas médias diferem entre si dos níveis do Fator analisado

Pela distribuição F, pode-se definir o nível de significância da estatística F calculada. Se este valor for menor do que 0,05, conclui-se pela rejeição de H₀ e aceitação de H₁.

Análise de regressão múltipla:

O modelo de regressão múltipla consiste em modelar um conjunto de observações através de funções matemáticas, com duas ou mais variáveis independentes. A variável dependente Y é uma função linear de uma série de variáveis independentes X₁, X₂, ..., X_n e um erro. O modelo pode ser escrito como:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 \cdot X_{2i} + \dots + \beta_k \cdot X_{ki} + \varepsilon_i$$

Onde:

Y – variável dependente

X's – variáveis independentes

ε – erro aleatório

β's – coeficientes

Para medir a proporção de variação explicada de Y pela equação de regressão, utilize-se o coeficiente de determinação (R²).

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

R² ajustado:

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{N - 1}{N - k}$$

onde:

k é o número de variáveis independentes

Com essas informações, fez-se um estudo com os dados das concentrações dos poluentes disponibilizados pela Fepam analisando os fatores meteorológicos que contribuem para a dispersão dos mesmos, e também considerando a topografia local e tendências meteorológicas locais, utilizando técnicas estatísticas multivariadas.