



MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA
MUSEU PARAENSE EMILIO GOELDI
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA

IVAN ROBERTO SANTOS ARAUJO

SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA
ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO DISTRITO INDUSTRIAL DE
BARCARENA-PA

BELÉM-PA
2012

IVAN ROBERTO SANTOS ARAUJO

SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA
ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO DISTRITO INDUSTRIAL DE
BARCARENA-PA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.
Área de Concentração: Física do Clima.
Orientador: Prof. Dr. Edson J. Paulino da Rocha.

BELÉM-PA
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

A663s Araujo, Ivan Roberto Santos

Simulação da dispersão de poluentes atmosféricos e avaliação da qualidade do ar na área de abrangência do Distrito Industrial de Barcarena-PA / Ivan Roberto Santos Araujo; Orientador: Edson José Paulino da Rocha - 2012.

98fl.: il.

Dissertação (mestrado em ciências ambientais) – Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2012.

1. Meteorologia. 2. Poluição Atmosférica. 3. Qualidade do Ar. 3. Emissões de Poluentes. 4. Índice de Qualidade do Ar. 5. Barcarena-PA. I. Rocha, Edson José Paulino da, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22º ed.: 551.5098115

IVAN ROBERTO SANTOS ARAUJO

SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA
ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO DISTRITO INDUSTRIAL DE
BARCARENA-PA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

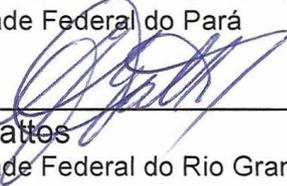
Data de Aprovação: 30 / 04 / 2012

Banca Examinadora:



Orientador

Edson José Paulino da Rocha
Universidade Federal do Pará



Arthur Mattos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



João Batista Miranda Ribeiro
Universidade Federal do Pará



Mario Augusto Gonçalves Jardim
Museu Paraense Emílio Goeldi

Dedico este trabalho a minha família (Osmarina, Aparecida, Roberto, Mayara, Mônica, Maysa, Ana Vitória e Alice), razão de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que me tem dado condições de alcançar meus objetivos, mesmo com todas as dificuldades do decorrer da vida.

Ao Prof. Dr. Edson Rocha pela valiosa orientação, amizade e pelos ensinamentos que foram de extrema importância para meu crescimento profissional e intelectual na realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Pará através do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências pela acolhida e oportunidade de voltar ao convívio universitário.

À Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Estado do Pará por fornecer meios e infraestrutura necessária ao desenvolvimento desta dissertação, em especial aos Técnicos Lourival e Felipe, pelas vivências cotidianas profissionais e auxílio nas questões técnicas deste trabalho.

Ao técnico do SIPAM Pedro Rolim, pela ajuda e orientação na construção e discussão dos dados meteorológicos.

A todos os colegas e professores do mestrado, cuja convivência foi um grande estímulo para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, em especialmente a minha mãe Osmarina Araujo, pelo amor, apoio e orações, esforços que produziram e ainda produzem frutos!

Agradeço a minha família, especialmente a Aparecida, minha amada esposa, não somente por seu amor, carinho e orações, mas também por seu esforço, companheirismo e contínuo incentivo. Sem você eu não chegaria até aqui.

E finalmente a todos que direta ou indiretamente colaboraram nesta jornada de mestrado.

“O choro pode durar uma noite, mas a alegria vem pela manhã”. Salmos 30:5.”

Bíblia Sagrada

RESUMO

A poluição atmosférica é considerada atualmente um dos maiores problemas da sociedade contemporânea, por ameaçar sua qualidade de vida, pois gera impactos negativos no meio ambiente natural e antrópico. Dentre as formas de controle da poluição atmosférica de fontes fixas podem-se destacar a diluição das emissões na atmosfera devido aos efeitos de dispersão, a adoção de equipamentos de controle antes do lançamento dos gases ou a realocação de fonte, visto ser uma possibilidade a ser sugerida durante o procedimento de licenciamento ambiental de empreendimentos com potencial poluidor do ar. Atualmente modelos computacionais de dispersão de poluentes na atmosfera vêm sendo amplamente utilizados na simulação da concentração de poluentes, visando auxiliar órgãos ambientais no prognóstico da qualidade do ar ou suprir deficiências de monitoramento de emissões atmosféricas. O presente trabalho estudou a qualidade do ar e avaliou a dispersão de poluentes atmosféricos sobre Vila do Conde e áreas de influência do Distrito Industrial de Barcarena, no município de Barcarena, estado do Pará, com auxílio do modelo AERMOD View, visto a possibilidade de se estabelecer uma relação entre os níveis de emissões dos poluentes na fonte, com as concentrações dos mesmos no ar, bem como identificar pontos críticos de poluição. O Índice de Qualidade do Ar – IQA e as fragilidades das populações humanas das áreas afetadas pelos poluentes atmosféricos, também foram mensurados na pesquisa. A metodologia empregada permitiu mensurar a concentração média de poluentes atmosféricos durante um determinado tempo de modelagem, informações quanto ao alcance da pluma de poluentes foram alcançados também. São fornecidos ainda informações quanto à relação entre o valor de pico e o valor médio da concentração nas áreas receptoras, provocadas por empreendimentos com características operacionais similares ao modelado. Os resultados demonstram que a influência de parâmetros meteorológicos, na dispersão de poluentes são indispensáveis e determinantes na previsão do impacto na qualidade do ar e no planejamento do uso e ocupação do solo de áreas que abrigam atividades poluidoras da atmosfera.

Palavras-chave: Meteorologia. Poluição Atmosférica. Qualidade do Ar. Emissões de Poluentes. Índice de Qualidade do Ar.

ABSTRACT

The atmospheric pollution is considered, nowadays, one of the biggest problems of the contemporaneous society, turning into a menace to its life quality, because generates negative impacts in the natural and anthropogenic environment. In the range of the forms to control atmospheric pollution originated by settled sources, come forth the emission dilution in the atmosphere due to dispersal effects, the adoption of control equipments before the casting of gases or the relocation of the source, cause it seems to be a suggested form during the environmental licensing process enterprises with potential air pollution. Currently computer models of dispersion of atmospheric pollutants are being largely used on the simulation of concentration of pollutants, objecting to help environmental agencies in the prognostic of air quality or to supply deficiencies of atmospheric emissions monitoring. The present research studies the air quality e evaluates the atmospheric pollutants dispersal over Vila do Conde and influence areas of the industrial district of Barcarena, state of Para, with the help of the AERMOD View model, considering the possibility of establishment of a relation between the levels of pollutants emissions in the source, with the concentration of them in the air and identify critical points of pollution as well. The Air Quality Index – IQA and the fragility of the population over the affected areas by the atmospheric pollutants were also measured in the research. The methodology used allowed to measure the mean concentration of atmospheric pollutants during a defined time of modeling and also information about the reaching of the pollutants plume were acquired. Information concerning the relation between the peak and the mean values of concentration in the receptive areas provoked by enterprises that have operational characteristics similar to the modeled are showed too. The results show that the influence of the meteorological parameters in the dispersion of pollutants are indispensable and determinants in the impact on the air quality prevision and also in the land use planning of areas that have atmospheric polluting activities.

Key words: Meteorology. Atmospheric pollution. Air quality. Pollutants emissions. Air quality index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Camadas da atmosfera e gradientes de pressão e temperatura.....	21
Figura 2-	Escalas espacial e temporal de compostos químicos presentes na atmosfera terrestre	23
Figura 3-	Comportamento dos ventos: barlavento (A) e sotavento (B).....	29
Figura 4-	Perfis verticais de temperatura típicos e formas das plumas.....	32
Figura 5-	Desenho esquemático da pluma gaussiana e distribuição das concentrações	42
Figura 6	Tratamento da Pluma na Camada Limite Convectiva no AERMOD.....	46
Figura 7	Mapa de localização da área alvo da pesquisa	51
Figura 8	Layout geral da área alvo da pesquisa	52
Figura 9	Temperaturas (°C) médias (máximas, mínimas e compensadas), durante o período de 2003 a 2010, na região de Barcarena.....	63
Figura 10	Velocidade do vento (média e máximas) durante o período de 2003 a 2010, na região de Barcarena.....	64
Figura 11	Direção predominante do vento (frequência %) durante o ano de 2010, na região de Barcarena.....	65
Figura 12	Precipitação (mm) média total anual, durante o período de 1981 a 2010, na região de Barcarena.....	67
Figura 13	Desvio anual normalizado da precipitação durante o período de 1981 a 2010 na região de Barcarena.....	68
Figura 14	Precipitação média mensal durante para o período de 1981 a 2010 na região de Barcarena.....	69
Figura 15	Relação entre os eventos de precipitação e as concentrações de partículas na área industrial de Barcarena e Vila do Conde no ano 2011.....	70
Figura 16	Evolução da concentração de partículas inaláveis na atmosfera da área industrial de Barcarena e Vila do Conde no período 2006 a 2011.....	71
Figura 17	Evolução da concentração de partículas observada na área industrial de Barcarena e Vila do Conde comparada ao padrão primário e secundário (limite PS) de qualidade do ar de 2006 a 2011.....	72

Figura 18	Evolução da concentração média anual de dióxido de enxofre observadas na área industrial de Barcarena e Vila do Conde no período de 2006 a 2011.....	74
Figura 19	Evolução das concentrações de dióxido de enxofre na área industrial de Barcarena e Vila do Conde, comparadas ao padrão primário de qualidade do ar (limite P) no período de 2006 a 2011.....	75
Figura 20	Evolução temporal da concentração de dióxido de enxofre na área industrial de Barcarena e Vila do Conde comparada ao padrão secundário de qualidade (limite S) do ar no período de 2006 a 2011.....	75
Figura 21	Concentrações de partículas monitoradas em Vila do Conde no ano de 2011, comparadas aos Índices de Qualidade de Ar (IQA).....	77
Figura 22	Concentrações de partículas monitoradas no Distrito Industrial no ano de 2011, comparadas aos Índices de Qualidade de Ar (IQA).....	78
Figura 23	Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações para simulação de 24 horas.....	80
Figura 24	Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma. Simulação anual.....	80
Figura 25	Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações sobre áreas habitadas. Simulação de 24 horas.....	81
Figura 26	Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações sobre áreas habitadas. Simulação anual.....	81
Figura 27	Modelagem de SO ₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma. Simulação de 24 horas.....	82
Figura 28	Modelagem de SO ₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma. Simulação anual.....	83
Figura 29	Modelagem de SO ₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma sobre áreas habitadas. Simulação de 24 horas.....	83
Figura 30	Modelagem de SO ₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma sobre áreas habitadas. Simulação anual.....	84
Figura 31	Centro de Saúde	86
Figura 32	Unidade de Saúde Familiar	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Relação entre fontes, poluentes e seus efeitos.....	24
Tabela 2-	Emissões de GEE no Estado de São Paulo e no Brasil em 2005.....	25
Tabela 3	Influências de áreas urbanas e rurais sobre o clima.....	30
Tabela 4	Características das plumas	33
Tabela 5	Os principais poluentes atmosféricos e seus efeitos sobre o meio ambiente natural e a saúde das pessoas.....	35
Tabela 6	Padrões de qualidade do ar, limites de concentração e referência temporal.....	38
Tabela 7	Índice da Qualidade do Ar	40
Tabela 8	Relação entre a qualidade do ar, índice e efeitos sobre a Saúde Humana	41
Tabela 9	Características físicas e localizações das fontes fixas emissoras utilizadas nas simulações	57
Tabela 10	Frequências das direções do vento na região de Barcarena no ano 2010.....	66
Tabela 11	Comparação entre as concentrações de PTS e SO ₂ simuladas e os padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA 03/1990.....	84
Tabela 12	População de Vila do Conde segundo faixa etária.....	86
Tabela 13	Distribuição da população residente e não residente por número de famílias e população das comunidades até 2007.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACS	Agentes Comunitários de Saúde
ANA	Agência Nacional de Água
ADMS	Advanced Dispersion Model System
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SP)
CLA	Camada Limite Atmosférica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQA	Índice de Qualidade do Ar
ISCST3	Industrial Source Complex Short-Term Model
MDT	Modelo Digital de Terreno
NCC	Núcleo de Condensação de Nuvens
PCPV	Plano de Controle de Poluição Veicular
PRONCOVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PRONAR	Programa Nacional de Controle da qualidade do Ar
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará
SIPAM	Serviço de Proteção da Amazônia
USEPA	US Environmental Protection Agency
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	ATMOSFERA DA TERRA E POLUIÇÃO DO AR	20
3.2	EMISSÕES INDUSTRIAIS	25
3.3	GERAÇÃO E DISPERSÃO DE POLUENTES NAS ÁREAS URBANAS E RURAIS	27
3.4	FATORES LIGADOS A CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	29
3.5	CONSEQUÊNCIAS GERAIS DA POLUIÇÃO DO AR	33
3.6	LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	36
3.6.1	Legislação Brasileira	36
3.6.2	Padrões de Qualidade do Ar	37
3.6.3	Níveis e Índice de Qualidade do Ar	39
3.7	MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS....	41
3.7.1	Tipos de Modelos de Dispersão	41
3.7.2	Modelos Gaussianos	42
3.7.3	Estudos Utilizando Modelos de Dispersão de Poluentes na Atmosfera.	43
3.8	DESCRIÇÃO DO MODELO AERMOD	45
3.8.1	Descrição do pré-processador AERMET	48
3.8.2	Descrição do pré-processador AERMAP	50
4	MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
4.2	DADOS TOPOGRÁFICOS E METEOROLÓGICOS	53
4.3	FONTES EMISSORAS	55
4.4	DADOS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	56
4.5	DADOS DA QUALIDADE DO AR	58
4.6	MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES	59
4.6.1	Definição da área de influência das plumas de poluentes	61

4.7	AVALIAÇÃO SOCIAL DAS ÁREAS AFETADAS PELOS POLUENTES	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS.....	62
5.1.1	Temperatura	63
5.1.2	Velocidade e Direção do Vento	64
5.1.3	Climatologia da Precipitação.....	66
5.2	QUALIDADE DO AR OBSERVADA.....	70
5.2.1	Partículas Inaláveis - PI	71
5.2.2	Dióxido de Enxofre	73
5.2.3	Índice de Qualidade do Ar	77
5.3	RESULTADOS DA MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES	79
5.3.1	Material Particulado - PM ₁₀	79
5.3.2	Dióxido de enxofre	82
5.4	QUADRO SOCIAL DAS ÁREAS AFETADAS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	85
6	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

A deterioração da qualidade do ar é considerada atualmente um dos maiores problemas das populações humanas, tornando-se uma das maiores ameaças à qualidade de vida da sociedade. Tudo isso como consequência das emissões da frota de veículos das grandes cidades e de áreas industriais. Desta forma, o desafio é conservar um padrão de qualidade do ar que não afete ou coloque em risco a saúde e bem estar das pessoas (FREITAS, 2003).

O setor industrial, devido à natureza de seu processo produtivo é considerado um grande causador de impactos ambientais, sobretudo no que se refere à poluição atmosférica, com potencial de induzir alterações nos parâmetros da qualidade do ar e sua consequente poluição, com isto gerando impactos negativos no meio ambiente natural e antrópico.

Em linhas gerais podemos entender poluição do ar, como o lançamento ou a presença na atmosfera de substâncias em concentração suficientes para interferir direta ou indiretamente na saúde, segurança e bem estar do ser humano ou no pleno uso de sua propriedade.

Para Derisio (2000) a poluição do ar é resultado do uso abusivo deste recurso natural que normalmente é utilizado pelas comunidades de maneira não parcimoniosa, em função do mesmo estar disponível sem que sua utilização exija qualquer ônus ou esforço. Além do que, os usos naturais do ar (metabólicos e físicos) efetuados pelo homem, animais e vegetação e dos benefícios dos fenômenos naturais meteorológicos, outros usos devem ser considerados como a combustão, processos industriais e, principalmente, a utilização do ar como receptor e transportador de substâncias gasosas das atividades antrópicas.

Na atmosfera, os poluentes são classificados em dois grupos: primários (aqueles emitidos diretamente pelas fontes) e secundários, como produto das reações fotoquímicas ocorridas na atmosfera entre os poluentes primários (BRASIL, 1990a). Como exemplo de poluentes primários destaca-se o Material Particulado, o Dióxido de Enxofre (SO_2) e o Dióxido de Nitrogênio (NO_2), o primeiro originado das operações de estocagem, manuseio, transporte de matérias-primas e combustão e os demais da queima de combustíveis fósseis. Representando poluentes secundários temos o Ozônio (O_3), resultante de reações fotoquímicas que se

estabelecem entre os óxidos de nitrogênio, o monóxido de carbono ou os Compostos Orgânicos Voláteis (COV).

Considerando os estudos de Fruehauf (1998), Melo e Mitkiewicz (2002) e Seinfeld e Pandis (1998) a concentração de poluentes na atmosfera não está ligada somente às fontes de emissão, mas também com seu grau de permanência e remoção determinado por fatores físicos como a topografia, o perfil da temperatura e a distribuição de pressão que influenciam diretamente a velocidade dos ventos e nível de turbulência, responsáveis pela dispersão dos poluentes atmosféricos.

De acordo com Santos (2006) é indiscutível a influência do clima na qualidade do ar de uma região, pois o transporte dos poluentes depende de condições meteorológicas que influenciam as condições de circulação local alterando a velocidade dos ventos e podem definir a altura das chaminés adequada para o lugar dentre outros fatores.

Neste contexto, deve-se considerar que poluentes atmosférico de origem antrópica, como o SO_2 e óxidos nitroso (NO_x), após reações químicas na atmosfera, podem elevar a acidez da chuva visto serem convertidos em ácido sulfúrico e nítrico, respectivamente.

Para Cerqueira (2010) a qualidade do ar é determinada por um conjunto de fatores que envolvem a intensidade das emissões dos poluentes, seu transporte, nível de concentração e tempo de decomposição na atmosfera.

Quando se intenciona avaliar a qualidade do ar de determinada região, geralmente se efetiva a quantificação das substâncias poluentes presentes na atmosfera através do monitoramento em locais de interesse, sendo realizado por instrumentos específicos para esse fim (CUNHA, 2002). No entanto, este monitoramento, às vezes, é limitado ou impreciso quando a extensão real da área afetada não é coberta ou não ocorre o monitoramento sistemático de concentrações de poluentes atmosféricos.

A modelagem matemática surge como auxílio na determinação das concentrações de poluente no ar e visando suprir as deficiências de medição e se constitui numa ferramenta que vem sendo amplamente utilizada no prognóstico da qualidade do ar de regiões com fontes de emissões de poluentes atmosféricos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Monteiro (2005) com a instalação do complexo industrial ALBRAS – ALUNORTE , em 1985, ocorreu aumento populacional do município de Barcarena e a consequente degradação de atributos naturais, pois imensas áreas tiveram que ser desapropriadas para a construção das plantas industriais e dos núcleos residenciais, Vila do Conde e Vila dos Cabanos, a elas ligados.

Diante do exposto, a principal justificativa para que o desenvolvimento deste trabalho é que para Barcarena, estudos dessa natureza são incipientes. Contudo, é um tema de grande importância para o desenvolvimento socioambiental do município, devido o crescimento industrial provocar impactos na atmosfera local como: aumento da concentração de partículas e de gases poluentes responsáveis pela degradação da qualidade do ar.

Por fim, entende-se que a análise das condições meteorológicas, da dispersão de poluentes e da qualidade do ar das áreas influenciadas pelo distrito industrial de Barcarena é uma das formas de promover o monitoramento dos níveis de poluentes presentes na atmosfera local, bem como do grau de risco que os habitantes das áreas afetadas estão expostos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a dispersão de poluentes atmosféricos (material particulado e dióxido de enxofre - SO₂) e estudar a qualidade do ar em Vila do Conde e áreas de influência do distrito industrial de Barcarena, visando identificar níveis de poluição nas áreas afetadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do estudo são:

- a) Estudar a climatologia da região (temperatura, velocidade do vento e direção do vento, precipitação) a partir dos dados da estação meteorológica de Vila do Conde.
- b) Caracterizar a qualidade do ar em Vila do Conde, a fim de comparar com as concentrações limites de poluentes legalmente instituídas.
- c) Avaliar a dispersão de poluentes atmosféricos por meio do modelo AERMOD View visando correlacionar com o clima e qualidade ambiental.
- d) Analisar os problemas sociais das áreas afetadas pela poluição atmosférica decorrentes das emissões geradas no Distrito Industrial de Barcarena.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ATMOSFERA DA TERRA E POLUIÇÃO DO AR

O ar atmosférico seco é composto, principalmente, por nitrogênio (78%) e oxigênio (21%) e além de traços de uma variedade de outros gases como o Argônio (1%). Embora presentes em concentrações muito pequenas, geralmente menores que algumas partes por bilhão em volume (ppb), estes gases tem um papel fundamental no estabelecimento do clima e na manutenção da vida no planeta, pois são importantes para a absorção e emissão de energia radiante (DERISIO, 2000).

No entanto na atmosfera além dos compostos gasosos, são encontradas substâncias sólidas e líquidas com reduzidas dimensões podendo possuir desde uma fração de milímetro até alguns nanômetros. Alguns destes elementos como, por exemplo, o Material Particulado (MP) são fundamentais para os processos atmosféricos como o da formação de chuvas, pois sua área de superfície influencia o núcleo de condensação de nuvens (NCC) (DERISIO, 2000). Para Seinfeld e Pandis (1998) a química da atmosfera é bastante ativa, apesar de reduzidas concentrações da maioria dos gases e particulados presentes no ar.

Para Ribeiro et al (2000) a atmosfera é uma espessa camada de gases que envolvem completamente o planeta Terra, assim formando um sistema ambiental integrado onde, nos primeiros 50 km de altitude, concentra aproximadamente 90% de toda massa da atmosfera.

Segundo Freitas (2003) a atmosfera terrestre é estruturada em camadas, onde as mais importantes do ponto de vista do clima e da poluição são a Troposfera, camada que inicia no solo e se estende até cerca de 12 km de altura e a Estratosfera, que começa a partir da Troposfera e alcança até 50 km (Figura 1).

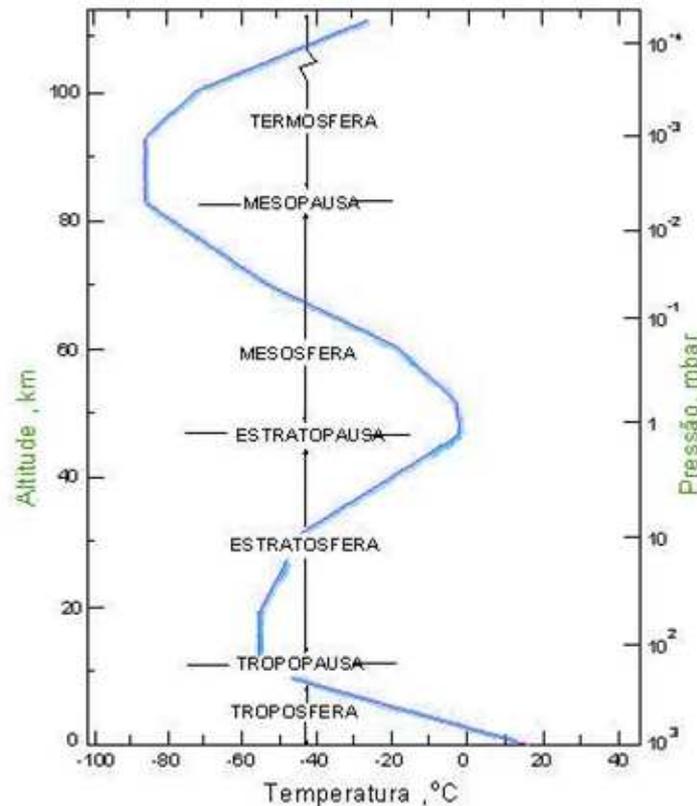
Considerando o aquecimento do ar contido na Troposfera pela absorção de boa parte da radiação de ondas longas emitidas do solo, confere a esta camada da atmosfera uma característica turbulenta, gerada pelo empuxo que as massas aquecidas mais próximas ao solo sofrem em relação àquelas, localizadas a maiores altitudes, normalmente mais frias. Como consequência a mistura vertical dos compostos químicos, nesta parte da atmosfera é acelerada e intensificada (FREITAS, 2003; PIRES, 2005).

Para Pires (2005) é na Troposfera que ocorre a maioria dos fenômenos atmosféricos e onde a manifestação dos problemas ambientais, como chuva ácida e turbidez atmosférica, se manifestam devido ao nível de intervenção antrópica a que está submetida. Já a camada seguinte, a estratosfera, é mais seca e contém grandes quantidades de ozônio, possui grande importância científica em função dos processos de absorção e dispersão da radiação solar incidente.

Para Freitas (2003) e Pires (2005) a Estratosfera apresenta características próprias, como a existência de alguns gases, sobretudo o Ozônio (O_3) estratosférico, responsável pela absorção de parte da fração da radiação solar contida na faixa do ultravioleta e por ser altamente energética, capaz de destruir os compostos orgânicos necessários à vida. Desta forma a Estratosfera possui um perfil de temperatura crescente com a altitude, tornando-a muito estável.

Acima da estratosfera estão, sequencialmente, as camadas mesosfera e termosfera, que influenciam diretamente a distribuição espectral da energia solar que alcança as camadas inferiores. Segundo Pires (2005) a estrutura vertical da atmosfera, delimitada em várias camadas sobrepostas, está baseada no perfil de temperatura que varia de acordo com a altitude, conforme mostra a figura 1.

Figura 1 – Camadas da atmosfera e gradientes de pressão e temperatura



Fonte: Seinfeld e Pandis (1998).

Na troposfera a camada de ar mais próxima à superfície é mais aquecida e os processos turbulentos são mais intensos, esta camada é chamada “camada limite planetária” de grande importância para o transporte e dispersão dos poluentes no ar.

A camada limite planetária é uma faixa de aproximadamente 1 km de altura a partir da superfície do solo onde a topografia, o perfil de temperatura e a distribuição de pressão têm efeito direto na estrutura e velocidade dos ventos e no nível de turbulência. Para Seinfeld e Pandis (1998), a camada limite determina o grau de manutenção ou dispersão de um poluente lançado na atmosfera em uma determinada região.

Na atmosfera existem alguns gases com tempos de permanência na atmosfera e influência espacial bastantes diferenciadas, como exemplo cita-se: o metano (CH₄), com detenção de uma dezena de anos e alcance em escala global. Os Clorofluorcarbonos (CFCs) e o Dióxido de Carbono (CO₂) também influenciam espacialmente todo o globo terrestre, porém temporalmente permanece na atmosfera em média algumas centenas de anos. (BAIRD e CANN, 2011).

Outros gases, como o NO_x, têm tempo de vida de apenas alguns dias e alcance em escala urbana ou local, de cerca de dezenas de quilômetros. O Dióxido de Enxofre (SO₂) possui tempo de residência na Troposfera de sete a quarenta dias, sendo dela removido principalmente por reação com a hidroxila (OH) (Figura 2). (BAIRD e CANN, 2011).

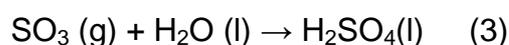
Na fase gasosa o dióxido de enxofre é oxidado por adição do radical hidroxila via uma reação intermolecular a seguir:



que é seguida por :



Na presença de água no estado líquido nas gotículas das nuvens, nevoeiros e outras formas de condensação atmosférica, o trióxido de enxofre (SO₃) é rapidamente convertido em ácido sulfúrico:



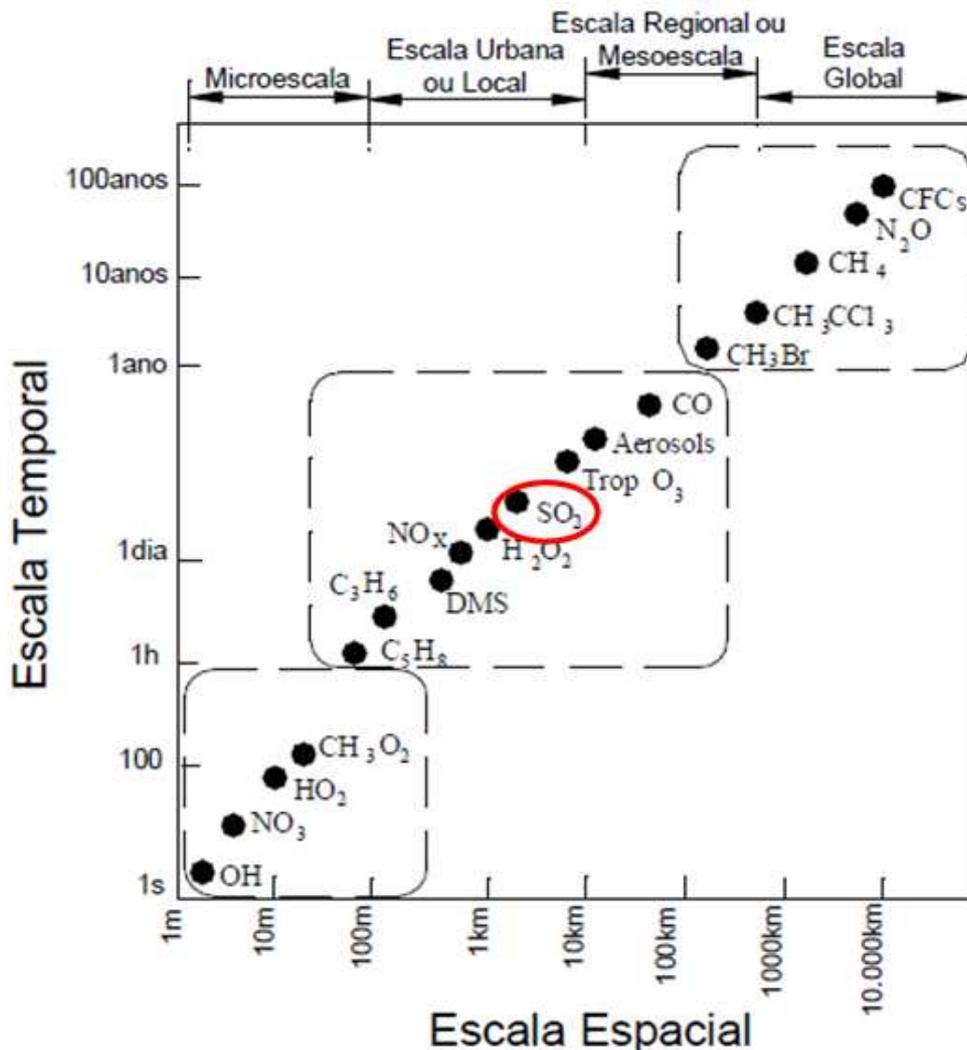
Quando ocorre a liberação de poluentes na atmosfera, sejam àqueles produzidos pela natureza ou de origem antrópica o equilíbrio físico/químico da atmosfera pode ser alterado e propriedades indesejáveis manifestam-se, como as

chuvas ácidas (BRASIL, 2006). Este desequilíbrio essencialmente é o que chamamos de poluição atmosférica que muitas das vezes resulta na degradação da qualidade do ar (ZILBERMAN, 2002).

Para Freitas (2003), poluir não é necessariamente a produção e introdução de substâncias estranhas e nocivas na atmosfera (apesar de algumas vezes isto acontecer). Poluir é lançar na atmosfera substâncias em volume acima do que o meio ambiente natural pode remover.

A retirada dos gases da troposfera é realizada processos físicos diversos como ventos e chuvas e dissolução em água, sobretudo em rios e mares ou por diferentes reações químicas como a fotólise, condensação, absorção e adsorção em material particulado, decantação de partículas, transferência para a estratosfera e atividades biológicas (BAIRD e CANN, 2011).

A Figura 2 – Escalas espacial e temporal de compostos químicos presentes na atmosfera terrestre.



Fonte: Seinfeld e Pandis (1998).

Os principais poluentes gasosos de origem antrópica (Tabela 1) são os Óxidos de Enxofre (SOx), Óxidos de Nitrogênio (NOx), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) e Hidrocarbonetos (HCs). (BAIRD e CANN, 2011).

As emissões industriais e veiculares possuem importante participação no balanço de poluentes atmosféricos, principalmente gases como CO e NOx. Para Philippi Jr. et al. (1999) nas últimas décadas os impactos na atmosfera das atividades antrópicas vão se manifestando cada vez mais, independente da nação, seja ela desenvolvida ou não.

Tabela 1 – Relação entre fontes, poluentes e seus efeitos.

Fonte	Poluentes		Efeitos no meio físico
	Material Particulado	Emissões gasosas	
Caldeiras e fornos industriais, usinas termoelétricas, refinarias de petróleo, sementeiras, usinas de aço e ferro.	Cinzas e fuligem	Óxidos de enxofre (SOx), NOx, Aldeídos, ácidos orgânicos.	Poluição do ar urbano, chuvas ácidas, redução da visibilidade;
Motores de combustão interna, emissões de veículos, gás natural, queima de carvão, indústria de petróleo, queima da biomassa, etc...	Fuligem	Metano (CH ₄), CO, NO, Aldeídos, Hidrocarboneto, 3,4-benzopireno	Efeito estufa, diminuição do O ₃ estratosférico (variável), contribui para a diminuição da autolimpeza da atmosfera;
Indústria de refino de petróleo, fábricas de ácido nítrico, usinas termoelétricas, usinas de ferro e aço, fábricas de fertilizantes, queima da biomassa etc.	Pó, fuligem	Óxidos de Nitrogênio (NOx), SO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , CO, hidrocarbonetos, aldeídos, cetonas.	Poluição do ar urbano, chuvas ácidas, impacto na visibilidade, diminuição do O ₃ estratosférico (variável).
Industria química, , oxidação do metano, queima da biomassa, processo industrial, etc.	Pó, fuligem	Dependente do processo (H ₂ S, CS ₂ , CO, NH ₃ , ácidos, solventes.	Poluição do ar urbano (local) com efeitos variáveis e temporários.
Metalurgia e Química do Coque, Combustão industrial, etc.	Pó, óxidos de ferro	CO ₂ , SO ₂ , CO, NH ₃ , compostos de flúor, substâncias orgânicas.	Efeito estufa, diminuição do O ₃ estratosférico;

Fonte: Adaptado de Lora (2002).

Para Pires (2005) com a Revolução Industrial, as inovações tecnológicas desenvolvidas intensificaram, sobretudo no setor industrial, o uso de combustíveis de origem fóssil que resultou em um nível de poluição capaz de alterar e às vezes comprometer os mecanismos regulatórios da atmosfera terrestre.

3.2. EMISSÕES INDUSTRIAIS

As atividades industriais, devido à natureza de seu processo produtivo são consideradas uma das grandes causadoras de impactos ambientais no meio ambiente, sobretudo no que se refere à poluição do ar. As indústrias representam uma das principais fontes de poluição do ar em áreas urbanas.

Segundo Lora (2002), as emissões de CO₂ atribuídas as indústrias esta entre as primeiras colocações do total, quando comparadas a outras atividades econômicas como geração de energia (detentora do primeiro lugar).

Tal afirmativa é ratificada por CETESB (2011a) onde no 1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do estado de São Paulo, compara as emissões do Estado de São Paulo com as do Brasil, essa comparação para o ano de 2005 é representada para os diferentes setores da economia pela Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Emissões de GEE no Estado de São Paulo e no Brasil em 2005.

Setor	São Paulo		Brasil		SP/BR
	Emissão	Participação	Emissão	Participação	
	Gg CO ₂ eq.	%	Gg CO ₂ eq.	%	
Energia	80.017	57,2	328.808	5,0	24,3
Indústria	20.610	14,7	77.939	3,6	26,4
Agropecuária	29.818	21,3	415.754	19,0	7,2
Resíduos	9.366	6,7	41.048	1,9	22,8
UTMUTF	0,0	0,0	1.329.053	60,6	0,0
Total	139.811	100	2.192.602	100	6,4

Fonte: CETESB (2011a).

- UTMUTF: Uso da Terra, mudança de uso da terra e floresta.

Segundo Christofolletti (1999) as emissões de gases poluentes pelas chaminés das indústrias variam de acordo com o processo produtivo empregado, tecnologia adotada, combustível usado e a presença de dispositivos específicos de controle de emissões como precipitador eletrostático, utilizado na retenção de material particulado.

Embora a poluição de origem industrial seja um problema complexo, existem alternativas capazes de reduzir em muito sua quantidade e conseqüentemente seus efeitos. Como afirmado por Lora (2002) que o controle da

poluição atmosférica de fontes fixas pode ser realizado fundamentalmente das seguintes formas: pela diluição das emissões na atmosfera devido aos efeitos de dispersão e pela adoção de providências capazes de minimizar as emissões como a instalação de equipamentos de controle antes do lançamento dos gases.

O controle pela diluição das emissões na atmosfera adota como fator principal a altura da chaminé, pois através desta condição a turbulência atmosférica transporta e dispersa os gases emitidos, assim evitando que altas concentrações de poluentes alcancem os receptores e causem algum dano aos mesmos (CORTEZ, LORA ; OLIVARES GÓMEZ, 2009).

Ressalta-se que o controle das emissões pela diluição é um método que apesar de dependente da capacidade de dispersão da atmosfera, mantém na maioria dos casos a qualidade do ar desejada. No entanto, esta técnica tem sido alvo de contestação de eficácia para emissões contendo poluentes como o SO₂, uma vez que as descargas atmosféricas das chaminés podem ser transportadas a longas distâncias e provocarem problemas como a chuva ácida (LORA, 2002).

Quanto ao método de controle na fonte pode ser efetivado através do emprego de ações como: realocação ou paralização da fonte, modificações ou otimização do processo produtivo e instalação de equipamentos de controle de emissões atmosféricas (CORTEZ, LORA ; OLIVARES GÓMEZ, 2009).

A realocação de fonte pode ser indicada, por exemplo, durante o procedimento de licenciamento ambiental de empreendimentos com potencial poluidor do ar, onde são avaliados estudos relacionados com os efeitos da poluição atmosférica sobre sua área de influência e quando necessário sugerir local mais adequado para a instalação da atividade com potencialidade de causar poluição atmosférica inadmissíveis na alternativa locacional originalmente escolhida. Normalmente a realocação se efetiva para áreas possuidoras de condições atmosféricas mais favoráveis, a fim de se manter os níveis de emissões aceitáveis sob o ponto de vista da qualidade do ar da região a ser afetada. Para casos onde a fonte emissora já esta operando, esta pode ser paralisada por um período de tempo quando os níveis de poluição se tornarem uma ameaça à saúde pública.

Segundo Pires (2005) nos Estados Unidos a agência de proteção ambiental (US Environmental Protection Agency - USEPA) tem exigido a interrupção de atividades quando ocorrem indicativos de condições meteorológicas

desfavoráveis à dispersão de poluentes capazes de causar graves episódios de poluição atmosférica.

Quanto ao controle através de modificações ou otimizações do processo produtivo, iniciativas como a substituição de combustíveis mais poluentes por outros menos agressivos ao meio ambiente é um bom exemplo. Da mesma forma a troca da fonte energética de origem fóssil por energia renovável, como solar ou eólica, esta dentro do contexto em questão (CORTEZ, LORA ; OLIVARES GÓMEZ, 2009).

Para Cavalcanti (2003) ações visando à remoção de elementos poluentes presentes no combustível na etapa de pré-combustão é outro aspecto importante a ser considerado. Sobre o tema, Carvalho e Lacava (2003) e Lora (2002) exemplificam a combustão por etapas que se constitui um dos métodos mais efetivos para a diminuição de NO_x . A fundamentação da técnica consiste na introdução, na zona de queima primária, de uma quantidade de ar menor que a tecnicamente necessária. Em determinadas circunstâncias, o nível de retirada de poluentes alcançado pela mudança ou otimização do processo é insuficiente para manter as emissões em níveis legalmente instituídos, assim necessitando do uso de equipamentos de controle adicionais que extraiam os poluentes presentes nos efluentes gasosos.

De acordo com Carvalho e Lacava (2003), Lora (2002) e Rendeiro et al. (2008) existem equipamentos projetados para controlar tipos específicos de poluentes gasosos. Desta forma, os citados equipamentos se utilizados individualmente e separadamente, são poucos eficientes na remoção de ambos os poluentes.

Assim para Lora (2002) e Pires (2005) dependendo das propriedades físico-químicas das emissões deve-se adotar técnica e instrumento de controle aplicável para cada caso, onde para remoção do SO_2 , utiliza-se o dessulfurizador. No caso de material particulado os principais equipamentos são os lavadores de gases, os precipitadores eletrostáticos, os ciclones e os filtros-manga.

3.3. GERAÇÃO E DISPERSÃO DE POLUENTES NAS ÁREAS URBANAS E RURAIS

As diversas formas do uso e ocupação do solo influenciam fortemente a geração e dispersão de poluentes do ar em determinadas áreas de um município, pois o processo de urbanização determina principalmente as edificações existentes, a localização das indústrias, o volume de tráfego de veículos entre outros. Assim,

nas cidades mais populosas, a poluição do ar vem sendo, frequentemente, associada às fontes fixas e móveis (IBGE, 2005).

A maior rugosidade das áreas urbanas em comparação as áreas rurais, provoca diminuição da velocidade do vento em até 30%. Isto ocorre devido à geometria dos prédios, o traçado das vias, a estrutura e morfologia das cidades que modificam o comportamento do vento em determinados locais. No entanto, deve-se considerar as ruas com inúmeros prédios, onde as paredes ficam muito próximas umas das outras formando uma espécie de cânion urbano, orientado na direção do vento, provocando uma ventilação excessiva. De forma oposta, as vias norteadas perpendiculares à direção do vento geram redução da circulação local (ZURITA; TOLFO, 2000). As emissões atmosféricas nas áreas urbanas são majoritariamente originadas pelas industriais e frota de veículos, onde sua dispersão pode ser prejudicada pela redução da velocidade do vento, provocada pelos obstáculos existentes na superfície do solo urbanizado.

Sobre as questões ambientais restritas aos territórios de uma nação, Seinfeld; Pandis (1998) consideram que quando se trata da poluição do ar a mesma deixa de ser um problema local para tornar-se global. De modo equivalente é possível afirmar que através da poluição atmosférica de cada município, torna-se um problema nacional (PIRES, 2005).

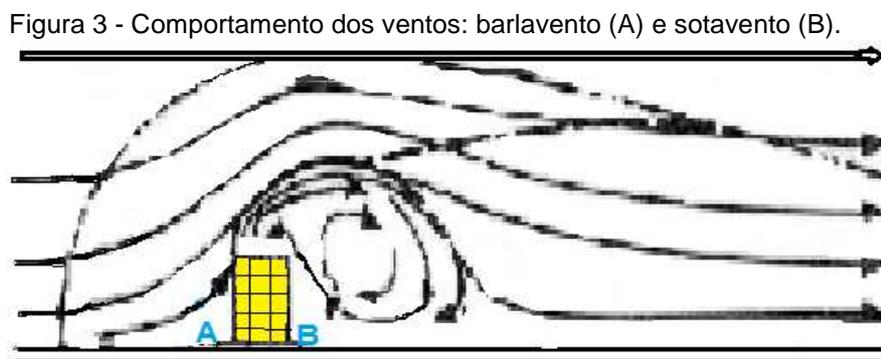
Com o objetivo principal de fazer com que haja uma contribuição local para reduzir as emissões, principalmente nos grandes centros urbanos do país, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, instituiu, em 1986, em âmbito nacional o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (BRASIL, 1986). Destaca-se também que o CONAMA, em 25 de novembro de 2009, publicou a resolução N° 418 onde prevê criação dos Planos de Controle de Poluição Veicular – PCPV's, que visam reduzir os impactos atmosféricos das atividades de fontes móveis, baseadas em diversas medidas como inventário de emissões atmosféricas, rede monitoramento da qualidade do ar, programas de inspeção e manutenção veicular e educação ambiental. Estas medidas visam restringir ainda mais a emissão de poluentes pelos veículos automotores (BRASIL, 2009).

3.4. FATORES LIGADOS A CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

O nível de concentração de poluentes em qualquer cidade esta relacionada diretamente com a fonte emissora e a capacidade de dispersão da atmosfera da região. Quando à fonte esta ligada a produção industrial deve-se considerar o número de pontos de emissão, o tipo de combustível, a tecnologia de combustão e o sistema de controle. Já a dispersão atmosférica é influenciada pela velocidade e direção do vento, perfil vertical da temperatura, topografia e outras características do meio físico do local (LORA, 2002).

Para Ribeiro (1993) em áreas urbanas onde as condições de dispersão são rotineiramente inadequadas, as ocorrências de poluição atmosférica são agravadas por situações de estabilidade atmosférica local. O transporte e a dispersão de poluentes são influenciados por fatores de microescala como a localização e geometria das edificações em áreas industriais, a cobertura do solo e a topografia do terreno.

Nas cidades a presença das edificações provoca alteração no padrão de circulação do ar, onde próximo a obstáculos a velocidade é rapidamente alterada podendo causar vórtices e turbulência. A Figura 3 apresenta um padrão de escoamento em torno de um prédio, com pouca dificuldade para contorná-lo a barlavento, mas a ação da viscosidade sobre a superfície do obstáculo provoca a formação de uma zona de baixa pressão a sotavento, capaz de “sugar”, o poluente trazendo-o para esta face do prédio.



Fonte: Adaptado de (RIBEIRO; ROCHA)¹

¹ RIBEIRO, J.B.M. ; ROCHA, E.P., A Meteorologia da poluição atmosférica – El Niño e mudanças globais. (a ser publicado).

Ressalta-se que a influência das cidades no clima regional é um importante elemento a ser considerado, pois a área urbana e rural apresentam diferentes manifestações para alguns parâmetros meteorológicos conforme a Tabela 3 a seguir.

Determinadas condições atmosféricas que afetam a dispersão de poluentes podem ser provocadas pela energia térmica emitida do solo durante a noite e da propagação desta energia às camadas de ar mais próximas, até uma altitude de algumas centenas de metros. Este mecanismo de transferência de calor do solo para o ar pode alterar a estabilidade atmosférica e provoca uma variedade de perfis verticais de temperatura. (DERÍSIO, 2000).

Tabela 3 – Influências de áreas urbanas e rurais sobre o clima.

CLIMA	ÁREA URBANA	ÁREA RURAL	CAUSA
Temperatura	Maior	Menor	Perda de energia para a atmosfera mais lenta
Radiação	Menor	Maior	Maior quantidade de nuvens na cidade
Nebulosidade	Maior	Menor	Mais núcleos de condensação de nuvens
Vento	Mais fraco	Mais forte	Maior quantidade de obstáculos
Umidade	Menor	Maior	Temperatura e cobertura vegetal
Chuva	Maior	Menor	Maior quantidade de núcleos de condensação de nuvens

Fonte: Derisio (2000).

O tipo de estabilidade atmosférica influi no perfil de velocidade do vento, assim como afeta o comportamento das plumas de poluentes atmosféricos emitidas por uma fonte. Na Figura 4 observa-se o provável comportamento de uma massa de gás ao ser lançada na atmosfera e deslocada pelo vento de acordo com os gradientes de temperatura apresentados. A linha pontilhada mostra o trajeto térmico (adiabático) de uma massa de gás na atmosfera. Ressalta-se que o gás pode ser originado de uma única fonte fixa (chaminé) ou ser uma massa de ar poluída de uma área industrial ou até mesmo de uma cidade.

Se no deslocamento vertical a massa de gás encontrar o ar com o mesmo perfil de temperatura ao seu redor, ela estará em uma condição de neutralidade atmosférica, onde a dispersão se dará através de uma pluma em conning, como no caso da Figura 4 (a), que ocorre essencialmente em condições de temperatura praticamente constante com o ambiente (DERÍSIO, 2000).

A conning ocorre com o céu esta encoberto e ventos tipicamente de fracos a moderados. Neste tipo de pluma, a maior concentração de poluentes é conduzida pelo vento a uma distância moderada, atingindo o nível do solo em consideráveis quantidades (PIRES, 2005).

Na hipótese do gás ficar mais frio que o ambiente ao tentar subir possuirá densidade maior. Caso fique mais quente ao tentar descer a densidade será menor, desta forma não poderá fazer nem uma coisa nem outra. Produz-se assim a pluma fanning mostrada na Figura 4 (b).

Geralmente a condição fanning é observada à noite e próximo ao amanhecer com ventos fracos e céu claro, tal condição propicia a formação de uma camada de ar estável às proximidades do solo, assim podendo resultar em uma atmosfera altamente estável. A fanning pode percorrer dezenas de quilômetros e quando visualizada por cima assemelha-se as sinuosidades de um rio, onde a turbulência mecânica é inexistente e o fluxo quase laminar. Este tipo de pluma é considerada favorável para emissão de poluentes, desde que a chaminé possua altura adequada aos obstáculos ao redor da fonte (DERÍSIO, 2000).

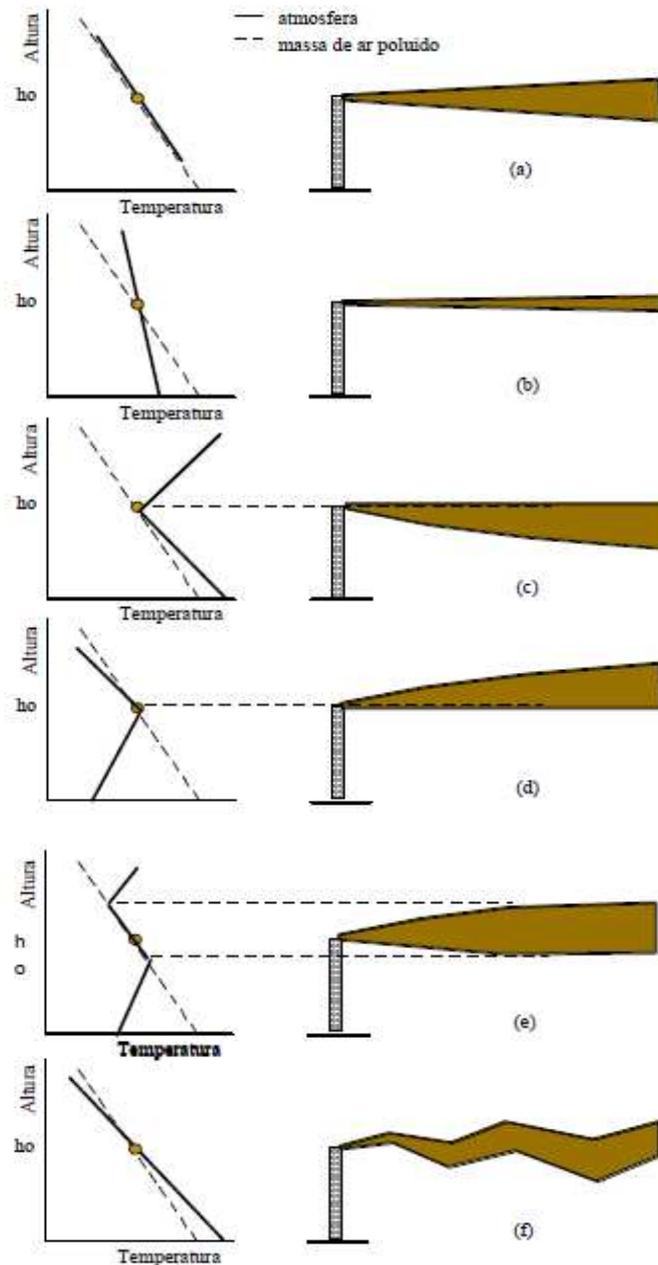
Caso a temperatura do gás seja menor que a do ar acima e abaixo do ponto de emissão, o poluente, mais denso, não poderá subir, todavia poderá eventualmente descer e atingindo o solo, assumindo a forma fummigation da Figura 4 (c). Esta condição é mais favorecida por céus claros e ventos fracos, durante o dia ou noite.

Na situação da temperatura do gás ser maior que do ambiente, acima e abaixo da fonte, o poluente poderá subir, mas terá dificuldade para descer, estando na condição da Figura 4 (d), pluma lofting. As condições desta pluma prevalecem no final da tarde e ao anoitecer sob condições de céu claro. Existe ainda a pluma trapping que é uma combinação das condições fummigation e lofting, conforme mostra a Figura 4 (e), onde existem inversões abaixo e acima da fonte emissora. Por último a pluma looping, mostrada na Figura 4 (f), configurando-se com um lapse rate super adiabático na atmosfera, ocorrendo em dia ensolarado, com céu limpo e ventos fortes, onde o solo é fortemente aquecido e transfere calor para as camadas de ar mais próximas a ele (DERÍSIO, 2000).

Como as camadas aquecidas tornam-se menos densas, são produzidos movimentos verticais ascendentes de ar quente que são compensados por

movimentos descendentes de ar mais frio, onde a pluma toma uma forma ondulante ao seguir as correntes verticais ora para cima, ora para baixo.

Figura 4 – Perfis verticais de temperatura típicos e formas das plumas.



Fonte: Pagliuso (2002).

A Tabela 4 apresenta resumidamente os tipos de pluma considerando as características do perfil da atmosfera, cobertura de nuvens, vento e período do dia.

Tabela 4 – Características das plumas.

PLUMA	PERFIL	CÉU	VENTO	PERÍODO
Coning	Sub Adiabático	Nublado	Leve a moderado	Diurno ou Noturno
Fanning	Inversão	Limpo	Leve	Diurno ou Noturno
Fumigation	Inversão	Limpo	Leve	Diurno
Lofting	Inversão	Limpo		Noturno
Trapping	Inversão	Limpo		
Looping	Super Adiabático	Limpo	Forte	Diurno

Fonte: Derisio (2000).

3.5. CONSEQUÊNCIAS GERAIS DA POLUIÇÃO DO AR

Para grande parte da comunidade científica internacional, um dos efeitos relacionados à poluição atmosférica são as mudanças climáticas no globo terrestre, atribuída a excessiva concentração de CO₂, assim promovendo o aquecimento global acima da média histórica (DERISIO, 2000). Outra consequência atribuída a poluição atmosférica é a chuva ácida com potencial de afetar os corpos hídricos, a vegetação e o solo que apesar da dificuldade de quantificar seus efeitos, evidências apontam a acidificação da chuva como uma das prováveis causas da redução do pH do solo e de alterações biológicas das águas em lagos interiores nos países industrializados e nos processos de morbidez acelerada de florestas nos países da Europa Central (BAIRD ; CANN, 2011).

Segundo Soares, Santos e Possa (2008) valores de pH abaixo de 5,65 são encontrados nas chuvas em diversas regiões do planeta, devido à oxidação de SO₂ e NO_x presentes na atmosfera de regiões poluídas, resultando nos ácidos fortes H₂SO₄ (ácido sulfúrico) e HNO₃ (ácido nítrico) que ao serem absorvidos pelas gotas de chuva, retornam à superfície como precipitações ácida.

Na fronteira Brasil - Uruguai, dados de chuva obtidos para o ano de 2001 revelaram pH abaixo de 5,65 em 70% das amostras analisadas. No lado brasileiro da área estudada foram verificadas influências de concentrações de SO₄⁻². Assim é atribuída ao ácido sulfúrico (H₂SO₄) a responsabilidade da chuva ácida na região pesquisada (SOARES, SANTOS ; POSSA, 2008).

Baird e Cann (2011) mostraram que um dos efeitos mais evidentes das precipitações ácidas são os impactos sobre as edificações ou monumentos constituídos de metais, como ferro e zinco, ou a base de carbonatos e mármore.

A diminuição do pH do solo e da água provoca a liberação de metais pesados e elementos químicos (Cu, Mn, Zn e Al) que podem, dependendo da concentração, causar toxidez à flora terrestre, bem como a fauna e flora aquática(VESILIND ; MORGAN, 2011).

Segundo Vesilind e Morgan (2011), a inalação do Dióxido de Enxofre (SO_2), mesmo em concentrações muito baixas, provoca espasmos passageiros dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares. Em concentrações maiores, provoca inflamações graves da mucosa e redução do movimento ciliar do trato respiratório, responsável pela remoção do muco e partículas estranhas, podendo aumentar a incidência da rinite, faringite e bronquite.

Baird e Cann (2011) observaram que pessoas asmáticas são as mais prejudicadas pelos aerossóis ácidos de sulfatos, mesmo em baixas concentrações. Existem evidências de que a acidez da atmosfera é o agente causador de disfunções do pulmão, incluído chiados e bronquites em crianças.

Em dias de intensa radiação solar o monóxido de nitrogênio (NO) é oxidado a dióxido de nitrogênio (NO_2), que é altamente tóxico as pessoas, aumentando sua susceptibilidade às infecções respiratórias e aos demais problemas respiratórios (VESILIND ; MORGAN, 2011).

Para Pires (2005), a exposição ao monóxido de carbono (CO) fora dos padrões de qualidade ambiental do ar pode provoca dores de cabeça, fadiga e vertigem, pois o CO reduz a capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue.

Outro importante poluente da atmosfera é material particulado, também chamado de fuligem é presente na fumaça preta liberada pela frota de veículos movidos a óleo Diesel que é a fonte mais rotineira de originá-lo, assim como resultante da queima de carvão mineral nas indústrias e termelétricas. Para Melo (2002) o material particulado é um poluente de importância fundamental, pois normalmente contém substâncias adsorvidas em sua superfície às vezes mais danosas que a partícula em si e desta forma apresentando riscos ao meio ambiente.

Segundo Carvalho Jr. e Lacava (2003) o material particulado ataca os pulmões, reduz a visibilidade, os níveis de radiação solar e provoca alterações nas taxas de reações na atmosfera. A exposição ao material particulado pode ocasionar

diferentes tipos de problema à saúde humana. A inalação de partículas pode causar pneumoconioses. A respiração de determinadas partículas pode resultar em efeitos tóxicos sistêmicos no organismo humano (SANTOS, 2006).

Em regiões industriais, as partículas em suspensão no ar podem transportar substâncias tóxicas ao pulmão devido à adsorção que ocorre na superfície das mesmas. Quando estão adsorvidas à superfície das partículas, essas substâncias penetram mais profundamente nos pulmões, onde a absorção pelas vias sanguíneas se processa mais facilmente do que nas vias respiratórias superiores. Alguns pesquisadores, Cavalcanti (2003), Lora (2002), Santos (2006), Soares, Santos e Possa (2008), consideram que a maior parte dos problemas respiratórios está associada à presença de material particulado no ar.

Para Santos (2006), além dos efeitos sobre a saúde humana, as partículas em suspensão na atmosfera podem alterar as condições de visibilidade afetando o clima, pela absorção da radiação solar, assim impedindo que tais radiações alcancem a superfície terrestre, ocasionando prejuízo à atividade fotossintética.

A tabela 5 apresenta um resumo dos principais poluentes atmosféricos e seus efeitos sobre o meio ambiente natural e saúde das pessoas.

A Tabela 5 - Os principais poluentes atmosféricos e seus efeitos sobre o meio ambiente natural e a saúde das pessoas.

Poluente	Características	Efeitos sobre Meio Ambiente Natural	Efeitos sobre a Saúde Humana
Partículas inaláveis (MP ₁₀) e Fumaça.	Partículas de material sólido o líquido que ficam suspensas no ar na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc.	Reduzem a visibilidade e alteram os níveis de radiação solar que atinge o solo	Atacam os pulmões.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor com odor forte. Pode ser oxidado em SO ₃ que na presença de vapor d'água passa rapidamente a H ₂ SO ₄ um ácido forte responsável pela acidificação das precipitações.	Pode levar a formação de chuva ácida e a corrosão dos materiais e danos a vegetação.	Desconforto na respiração. Agravamento nas doenças respiratórias e cardiovasculares.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	É um gás de coloração marrom alaranjado, com odor forte e irritante e altamente tóxico ao ser humano.	Pode levar a formação de chuva ácida provocando danos a flora e fauna. Smog fotoquímico.	Aumento da sensibilidade de asma e bronquite. Reduz a resistência à infecções respiratórias.
Monóxido de Carbono (CO)	É um gás que não possui cheiro, não tem cor, não causa irritação e não é percebido pelos sentidos humanos.	O CO pode ser oxidado em CO ₂ e contribui para o efeito estufa.	Pode causar leve dor de cabeça, perda da consciência e até a morte por asfixia.
Ozônio (O ₃)	É um gás inodoro e incolor, sendo o principal componente do smog encontrado em áreas urbanas.	Corrosão de materiais.	Irritações passageiras no sistema respiratório, dores no peito com a respiração profunda.

Fonte: adaptado de Carvalho Jr. e Lacava (2003) e Vesilind e Morgan (2011).

3.6. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A legislação brasileira em vigor possui várias leis e resoluções ligadas ao meio ambiente, objetivando o controle da poluição em qualquer de suas formas inclusive a atmosférica.

3.6.1 Legislação Brasileira

O parágrafo VI, art. 23, da Constituição da República Federativa do Brasil determina ser competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos municípios, proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas. (BRASIL,1988). Já o parágrafo VI, do artigo 24 da Constituição Brasileira determina que compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição. (BRASIL,1988).

O artigo 225 da Constituição do Brasil foi reservado exclusivamente para tratar do meio ambiente, onde cita que:

todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. (BRASIL, 1988).

Além da Constituição Brasileira existe a Lei Federal n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo decreto Federal n.º 99274 de 06 de junho de 1990, dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de aplicação e dá outras providências (BRASIL, 1981).

Dentre as resoluções do CONAMA que tratam de poluição atmosférica, deve-se atentar para a resolução CONAMA nº 18, de 06 de maio de 1986, dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores (PROCONVE), à resolução 05, de 15 de junho de 1989, que dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da qualidade do Ar (PRONAR), à resolução CONAMA 03, de 28 de Junho de 1990, que dispõe sobre padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR, à resolução CONAMA 08, de 06 de dezembro de 1990, que dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição, à resolução 382, de 26 de dezembro de 2006, que estabelece os limites máximos de emissão de

poluentes atmosféricos por fontes fixas e a resolução 418, de 25 de novembro de 2009, dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular – PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente (BRASIL, 1989, 1990a, 1990b, 2006 e 2009).

No âmbito do Estado do Pará a Lei Estadual n.º 5.887, de 09 de maio de 1995, nos Art. 18 a 21 dispõe sobre o controle da poluição atmosférica, fontes de poluição e outras providências e incube a Secretaria de Estado de Meio Ambiente a divulgação dos níveis de qualidade e das principais fontes poluidoras (PARÁ, 2005).

3.6.2 Padrões de Qualidade do Ar

A resolução CONAMA N° 03, de 28 de junho de 1990, institui os padrões de qualidade do ar e as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população. Assim, o nível de poluição do ar é medido pela quantificação das substâncias poluentes que se apresentam a cada momento.

Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso da propriedade e às atividades normais da coletividade (BAIRD ; CANN, 2011).

A variedade de substâncias que podem estar presentes na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. Entretanto, admite-se dividir os poluentes em duas categorias: poluentes primários e poluentes secundários.

As substâncias usualmente consideradas poluentes do ar podem ser classificadas da seguinte forma:

- Compostos de enxofre (SO_2 , SO_3 , H_2S e sulfatos);
- Compostos de nitrogênio (NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 e nitratos);
- Compostos orgânicos de carbono (hidrocarbonetos, alcoóis, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos);
- Monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2);
- Compostos halogenados (HCl , HF , cloretos, fluoretos);

- Material particulado (MP): mistura de compostos finamente granulados no estado sólido ou líquido.

A Resolução CONAMA nº 03/1990 divide os padrões de qualidade do ar em primários e secundários. São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Quanto aos padrões secundários de qualidade do ar, são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais 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. (BRASIL, 1990a).

O padrão – primário ou secundário – que deve ser aplicado depende da Classe da área do local. A Resolução CONAMA N°05/89 estabeleceu as Classes I, II e III, sendo que somente através de Resolução específica é que as citadas áreas serão definidas (BRASIL, 1989).

Um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem estar das pessoas. Na Tabela 6 são apresentados os padrões de qualidade do ar, os limites máximos de concentração e a referência temporal para os principais poluentes fixados na resolução CONAMA 03/1990.

Tabela 6 - Padrões de qualidade do ar, limites de concentração e referência temporal.

Poluentes	Padrão Primário		Padrão Secundário	
	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tempo de Amostragem	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tempo de Amostragem
Partículas Totais em Suspensão - PTS	80	1 ano	60	1 ano
	240	24 horas	150	24 horas
Partículas Inaláveis - PI (< 10 μm)	50	1 ano	50	1 ano
	150	24 horas	150	24 horas
Dióxido de Enxofre (SO_2)	80	1 ano	40	1 ano
	365	24 horas	100	24 horas
Monóxido de Carbono (CO)	10.000 (9ppm)	8 horas	10.000 (9ppm)	8 horas
	40.000 (35ppm)	1 hora	40.000 (35ppm)	1 hora
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	100	1 ano	100	1 ano
	320	1 hora	190	1 hora
Fumaça	60	1 ano	100	24 horas
	150	24 horas	40	1 ano
Ozônio	160	1 hora	160	1 hora

Fonte: Brasil (1990a).

Sobre a classificação de poluentes primários e secundários percebe-se que é feita tanto na base química quanto na física, pois o grupo “material particulado” se refere ao estado físico, enquanto outros se referem a uma classificação química (BAIRD ; CANN, 2011).

A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera define o nível de qualidade do ar, que determina, por sua vez, o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores (LORA, 2002). A determinação sistemática da qualidade do ar deve ser limitada a restrito número de poluentes, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis. A escolha de indicadores da qualidade do ar recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como referência dentre eles o dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (BAIRD; CANN, 2011). A razão da seleção de parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente (DERISIO, 2000).

3.6.3 Níveis e Índice de Qualidade do Ar

A Resolução CONAMA 03/1990 estabelece os níveis de qualidade do ar (Atenção, Alerta e Emergência) objetivando, entre outros, prevenir grave e iminente risco à saúde da população em função da presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período de tempo, resultantes de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos. Em qualquer um dos níveis citados podem ser consideradas concentrações de poluentes como dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, partículas totais em suspensão, partículas inaláveis, ozônio e outros (BRASIL, 1990a).

Os níveis de qualidade do ar apresentam limites de concentrações de poluentes que ultrapassadas (Atenção e Alerta) podem exigir providências para evitar o atingimento do nível mais crítico (Emergência) de poluição ou até mesmo medidas de restrições das fontes emissoras, estabelecidas pelo órgão de controle ambiental, durante a permanência do nível de emergência (BRASIL, 1990a).

Quanto ao índice de qualidade do ar (IQA), este indica o nível de poluição do ar aplicável à determinada zona de um município, região metropolitana ou do território de um estado, visando informar a população sobre a qualidade do ar local, em relação a diversos poluentes atmosféricos amostrados nas estações de

monitoramento existentes, sendo divulgado através de um boletim diário da qualidade do ar como acontece em São Paulo - SP (CETESB, 2011b).

O índice é obtido através de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar. Para cada concentração gravimétrica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a função atribui um valor índice, que é um número adimensional. Por definição, ao nível do padrão primário é atribuído um índice de 100, o nível de Atenção equivale a um índice de 200, o nível de Alerta a um índice de 300 e o nível de Emergência a um índice de 400, Tabela 7, (CETESB, 2011b).

Um exemplo da aplicação do IQA é descrita a seguir: se analisarmos uma média horária de Partículas Inaláveis (MP_{10}) de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, isto seria exatamente o padrão primário e, portanto corresponde a um índice de 100, sendo a qualidade do ar REGULAR. Caso o resultado fosse de apenas $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o correspondente índice seria 50, significando a qualidade do ar como BOA.

Tabela 7 – Índice da Qualidade do Ar

Qualidade	Índice	MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Boa	0 -50	0 -50	0 -80	0 -4,5	0 -100	0 -80
Regular	51 -100	50 -150	80 -160	4,5 -9	100 -320	80 -365
Inadequada	101 -199	150 -250	160 -200	9 -15	320 -1130	365 -800
Má	200 -299	250 -420	200 -800	15-30	1130 -2260	800 -1600
Péssima	>299	>420	>800	>30	>2260	>1600

Fonte: CETESB (2011b)

Uma aplicação real do IQA são as informações de qualidade do ar monitoradas pela CETESB e divulgadas por meio de um índice numérico de qualidade do ar desenvolvido para simplificar o entendimento da população.

Para efeito de classificação, é utilizado o índice mais elevado, isto é, a qualidade do ar de uma estação é determinada pelo pior caso entre poluentes em cada estação de monitoramento (CETESB, 2011b). A relação entre a qualidade do ar, índice e efeitos à saúde é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Relação entre a qualidade do ar, índice e efeitos sobre a Saúde Humana.

Qualidade	Índice	Significado
Boa	0 -50	Considera-se que não há riscos à saúde.
Regular	51 -100	A população, em geral, não é afetada. No entanto grupos de pessoas sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
Inadequada	101 -199	A totalidade da população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, irritação e ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar efeitos mais graves na saúde.
Má	200 -299	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	>299	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes

Fonte: CETESB (2011b).

3.7. MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Atualmente modelos computacionais de dispersão de poluentes na atmosfera vêm sendo amplamente utilizados na simulação da concentração de poluentes, visando suprir deficiências de monitoramento de emissões atmosféricas originadas de uma chaminé ou escapamento de veículos, assim como auxiliar no prognóstico da qualidade do ar.

A utilização de modelos de dispersão atmosférica é uma ferramenta útil para auxiliar estudos de minimização de riscos, pois permite estabelecer uma relação entre os níveis de emissão dos poluentes na fonte, com as concentrações dos mesmos no ar, bem como identificar pontos críticos de poluição e auxiliar nas previsões de impactos ambientais (LORA, 2002)

3.7.1 Tipos de Modelos de Dispersão

Os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos podem ser classificados por métodos de resolução das equações que são divididos em duas categorias: Modelos Analíticos e Modelos Numéricos. Os modelos analíticos

utilizados nos estudos de dispersão são todos baseados na função da distribuição Gaussiana (LORA, 2002).

Para Ramos e Falaguasta (2010), em geral os modelos numéricos são mais complexos e, portanto mais exigentes em termos de recursos computacionais. Assim, esses modelos são utilizados somente quando há necessidade de interpretar situações complexas envolvendo reações secundárias provocadas pelas emissões e quando se deseja conhecer melhor o fenômeno de transportes dos poluentes na atmosfera.

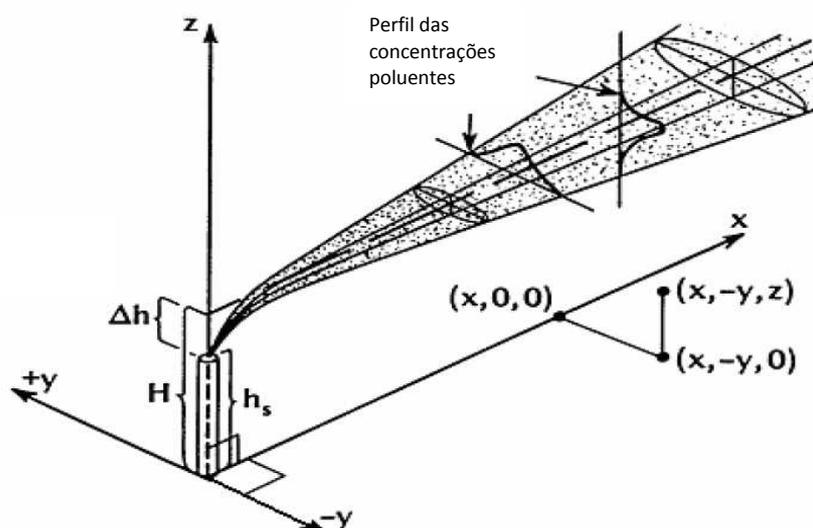
Os modelos analíticos por serem de fácil aplicação e de pouca exigência em termos de recursos computacionais, são utilizados com maior frequência para subsidiar os estudos de dispersão atmosférica (RAMOS e FALAGUASTA, 2010).

3.7.2 Modelos Gaussianos

Os modelos Gaussianos são frequentemente usados em estudos ambientais que envolvem dispersão de poluentes atmosféricos ou para atender exigências de licenciamento ambiental de atividades poluidoras do ar.

A Figura 5 apresenta um desenho esquemático do modelo de pluma gaussiana, assumida a partir de uma fonte pontual.

Figura 5 – Desenho esquemático da pluma gaussiana e distribuição das concentrações.



Fonte: Adaptado de Lora (2002); Ramos e Falaguasta (2010).

Os modelos Gaussianos são baseados em uma fórmula que descreve um campo de concentrações tri-dimensional, onde sua equação assume que o espalhamento do efluente de uma fonte contínua tem uma distribuição normal ao eixo horizontal da pluma, tanto no plano horizontal, como no vertical (direção vertical z e direção y perpendicular à direção do vento) (LORA, 2002).

Os modelos Gaussianos apresentam as seguintes características: a pluma se desloca com velocidade constante igual à do vento e na mesma direção e; as dimensões da pluma descrevem-se por meio de coeficientes de dispersão; a emissão de poluentes é constante e ocorre a partir de uma fonte pontual; não há deposição nem reação da pluma na superfície; e o poluente não se perde por desintegração, reação química ou deposição. Tais modelos são utilizados com frequência no prognóstico de concentrações de contaminantes presentes na atmosfera, especialmente no cálculo das máximas concentrações ao nível do solo (LORA, 2002).

Os modelos Gaussianos ao longo do tempo tem sido alvo de aprimoramentos, assim permitindo simulações do comportamento da dispersão de poluentes na atmosfera de maneira mais realística. Um exemplo disso é a incorporação de condições de terrenos complexos, variações no regime da CLA e mudanças da direção e intensidade do vento existente em modelos mais modernos como o AERMOD (VELLOSO, 2007).

3.7.3 Estudos Utilizando Modelos de Dispersão de Poluentes na Atmosfera.

A literatura apresenta vários estudos que utilizaram modelos de dispersão de poluentes como apoio ao entendimento de problemas de poluição na atmosfera. Dentre estes trabalhos, pode-se citar Hanna et al (2001), Cimorelli et al. (2004a, 2004b), Velloso (2007) e Santos, Varejao e Silva (2011). Os citados estudos são comentados na sequência.

Hanna *et al* (2001) elaboraram um trabalho comparativo entre os modelos computacionais ADMS (*Advanced Dispersion Model System*), ISCST3 (*Industrial Source Complex Short-Term Model*) e o AERMOD (*American Meteorology Society, Environmental Protection Agency, Regulatory Model*), objetivando a avaliar os aperfeiçoamentos que os modelos ADMS e AERMOD possuem em relação ao ISCST3, avaliando-se diferentes padrões de emissões e características geográficas das áreas de estudo. Os autores concluíram que, no desempenho geral dos

modelos, o ADMS exibiu melhor resultado, seguido do AERMOD, e os piores resultados foram apresentados pelo modelo ISCST3. Foi verificado também que o ADMS e o AERMOD demonstraram desempenho similar, mostrando ligeira tendência a subestimarem a máxima concentração prevista em relação à máxima concentração observada.

Cimorelli *et al.* (2004b) apresentam uma descrição das principais equações usadas no modelo de dispersão AERMOD, contendo equações para a caracterização da camada limite, a representação de como o AERMOD aborda as questões relativas à influência de terreno planos e complexos e o algoritmo utilizado pelo AERMOD na previsão da concentração em condições de estabilidade e de instabilidade da atmosfera.

Veloso (2007) avaliou os modelos Gaussianos de qualidade do ar AERMOD e ISC, utilizados para fins regulatórios, segundo recomendação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). A área do estudo foi a Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e o período considerado foi o ano de 2002. Para as simulações foram consideradas as emissões do poluente SO₂ originadas de 24 fontes fixas e 22 fontes móveis. Os resultados das modelagens foram comparados com os dados observados nas estações de monitoramento da qualidade do ar.

Santos, Varejao e Silva (2011) a influência do fluxo de veículos, após a ampliação da Avenida Fernando Ferrari, Vitória - ES, sob a qualidade do ar nos bairros localizados nas redondezas do local e o montante populacional sob efeito da poluição. O estudo utilizou-se aplicativos computacionais: RAMMET; WRPLOT; ENVIMAN 2.0.50 (aplicativo computacional AERMOD); e ArcGIS 8.3. No desenvolvimento do trabalho foram gerados mapas de isoconcentrações de poluentes (NO_x e PM₁₀) provenientes de veículos, nos anos de 2004 e 2010 e realizada uma projeção para o ano de 2014.

Os autores concluíram que o maior contingente populacional sob efeito da poluição nos anos estudados, ocorreu nos seis primeiros anos após a conclusão da ampliação da avenida, no entanto não chegará a ser nocivos à saúde humana, segundo os padrões de qualidade do ar da resolução CONAMA nº 03/1990.

3.8. DESCRIÇÃO DO MODELO AERMOD

O modelo de dispersão AERMOD da USEPA, atende as recomendações constantes na referência *Code of Federal Regulations CFR 40, "Part 51, appendix W – Guideline on Air Quality Models", 2007*, modelo este que é operacionalizado através do software AERMOD View versão 7.3.0 da Lakes Environmental Consultants, Inc. Ontário-Canadá.

O modelo AERMOD View possui as seguintes características técnicas:

- Modelo para fontes industriais;
- Pode ser utilizado para modelagem de poluentes primários (convencionais) e poluentes tóxicos;
- Pode manusear várias fontes como chaminés, áreas, volumes e linha;
- Receptores da área de influência podem ser representados por sistema de coordenadas Cartesianas (x, y, z) ou coordenadas Polares, com opção de considerar a elevação de cada ponto do receptor da coordenada em relação ao nível do mar;
- Dados meteorológicos reais ou simulados;
- Resultados das concentrações de poluentes para períodos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 e 24 horas, mensais ou anuais.

O AERMOD é um modelo Gaussiano onde as concentrações são calculadas a partir da seguinte equação:

$$\text{onde: } C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (4)$$

x,y = coordenadas cartesianas que identificam o ponto analisado [m];

z = altitude média do ponto analisado, em relação ao nível do mar [m];

Q = taxa de emissão do poluente [g s⁻¹];

u_s = velocidade média do vento na altura de emissão [m s⁻¹];

σ_y = parâmetro de dispersão na direção lateral ao eixo da pluma [m];

y = distância ortogonal do ponto analisado ao eixo da pluma [m];

h = altura efetiva de emissão [m];

σ_z = parâmetro de dispersão na direção vertical ao eixo da pluma [m];

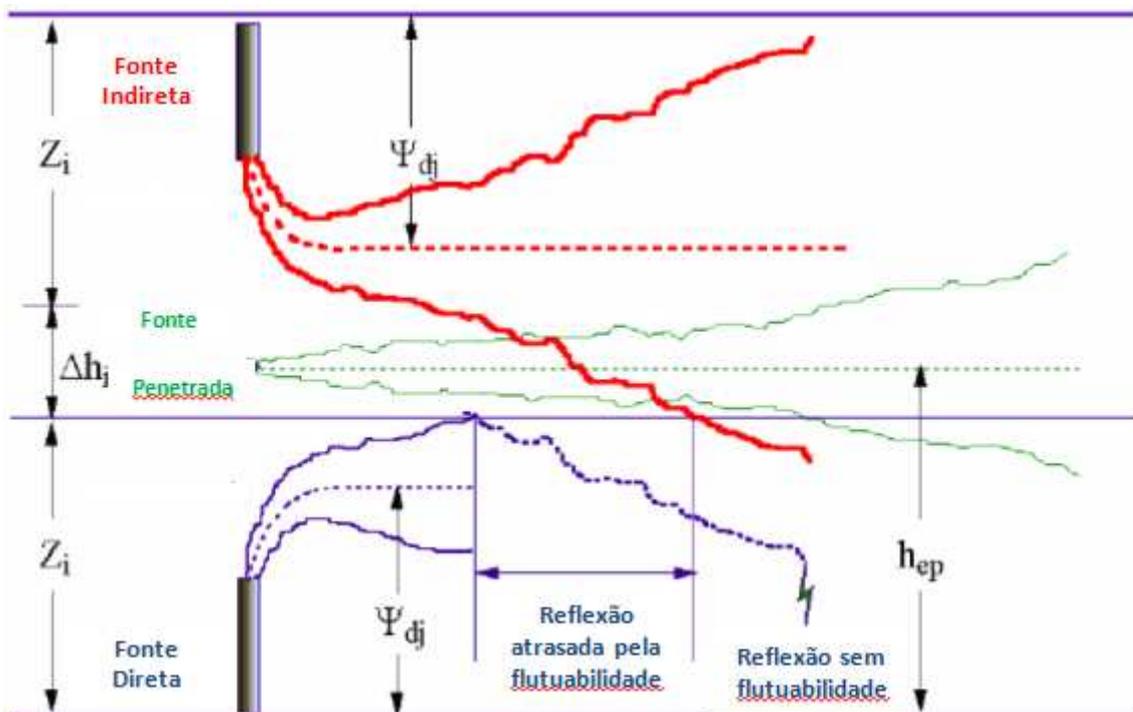
Os parâmetros de dispersão são uma representação da intensidade de turbulência atmosférica com a consideração de turbulência estacionária e

homogênea. Os parâmetros de dispersão σ_y e σ_z dependem da distância da fonte emissora ao ponto analisado.

O AERMOD consiste de um processador principal e dois pré-processadores, o AERMET e o AERMAP. O pré-processador AERMET é responsável pelo preparo dos dados meteorológicos disponíveis para o uso pelo AERMOD. O pré-processador AERMAP organiza os dados de terreno e de localização da(s) fonte(s) e receptor(es) para posterior uso pelo programa principal.

O modelo AERMOD quando comparado com outros modelos, apresenta avanços em sua formulação da dispersão de poluentes na camada limite convectiva. Para fins de previsão da concentração de um poluente o modelo executa o tratamento da pluma na camada limite convectiva considerando três tipos de contribuição: fonte indireta, fonte direta e a fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva (CLC). Em termos de concentração de poluentes, a fonte indireta contribui quando a velocidade da pluma sobrepõe à velocidade de elevação da mesma transportando-a para a superfície. (EPA, 2004a).

Figura 6 - Tratamento da Pluma na Camada Limite Convectiva no AERMOD.



Fonte: Adaptado de EPA (2004a).

A contribuição da fonte direta acontece quando a pluma alcança a CLC, sendo então deslocada à superfície. Nesta fonte, é importante destacar que o deslocamento da pluma sofre um “retardo” ocasionado pela ação das forças de

empuxo (flutuabilidade). Por fim, o modelo AERMOD calcula a contribuição da porção da pluma que penetra além da CLC e posteriormente reentra nesta camada, atingindo a superfície e dispersando-se (EPA, 2004a).

O AERMOD calcula a concentração total, somando a contribuição de cada uma das três fontes citadas anteriormente explanadas na Figura 6, conforme a Equação 5. (EPA, 2004a):

$$C(x, y, z) = C_d(x, y, z) + C_p(x, y, z) + C_r(x, y, z) \quad (5)$$

A contribuição da fonte direta é obtida a partir da Equação 8.

$$C_d(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}u} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (6)$$

$$\text{Com } \psi_{dj} = h_s + \Delta h_d + \frac{\bar{w}_j x}{u} \text{ e } F_y = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right) \quad (7)$$

Onde C_d = concentração devida a fonte direta [ML^{-3}];

Q = taxa de emissão pela chaminé [MT^{-1}];

U = velocidade do vento [LT^{-1}]

σ_y, σ_z = coeficientes de dispersão lateral e vertical

x, y, z = distância segundo as direções dos eixos coordenados [L]

f_p = fração do material emitido pela fonte que permanece na camada limite convectiva, $0 < f_p < 1$;

j = 1 para linha inferior da pluma e 2 para a linha superior da pluma, conforme Figura 6;

ψ_{dj} = altura entre a base d fonte e a linha central da pluma [L];

λ = coeficiente da distribuição;

$\text{Exp}(\cdot) = e^{(\cdot)}$, onde e é a base dos logaritmos naturais;

A contribuição da fonte indireta é obtida a partir da Equação 6:

$$C_r(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}u} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z + \psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - \psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (8)$$

Com $\psi_{ij} = \psi_{aj} - \Delta h_i$, sendo que Δh_i , representa a parcela da pluma que se ultrapassa o topo da camada limite convectiva (Figura 6) e C_r representa a parcela da pluma emitida pela fonte indireta.

A contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva é dada pela Equação 7.

$$C_p(x, y, z) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{sp}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z-h_{cp}+2mz_e)^2}{2\sigma_{sp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{cp}+2mz_e)^2}{2\sigma_{sp}^2}\right) \right] \quad (9)$$

Onde Z_i = altura da camada de mistura mecânica [L];

H_{ep} = altura da pluma que adentra além do topo da camada limite convectiva [L].

Analisando-se as Equações 5 a 9 que se referem à pluma gaussiana, pode-se observar que o termo à esquerda da igualdade representa a concentração de um determinado poluente em um ponto qualquer do espaço. Maiores detalhes sobre a formulação matemática do modelo AERMOD na camada limite convectiva e na camada limite estável e do pré-processador de dados meteorológicos AERMET podem ser obtidos em EPA (2004a).

3.8.1 Descrição do pré-processador AERMET

O AERMET é um pré-processador de dados meteorológicos, cuja principal função é organizar os dados meteorológicos disponíveis preparando-os para o uso no AERMOD. O processamento das informações meteorológicas ocorre em três estágios: o primeiro deles consiste na extração e tratamento dos dados meteorológicos. Em sequência, o AERMET agrupa os dados em períodos de 24 horas e grava em um único arquivo. Finalmente, o terceiro estágio consiste na leitura dos dados agrupados e na estimativa dos parâmetros da camada limite utilizado no AERMOD. (EPA, 2004b).

O AERMET tem como função principal a determinação dos parâmetros da camada limite para posterior uso pelo AERMOD, que se utiliza destes parâmetros para gerar o perfil de variáveis meteorológicas necessário à simulação da dispersão dos poluentes. São fornecidas ao AERMET informações de observações meteorológicas, tais como: velocidade e direção do vento, temperatura e cobertura de nuvens, bem como características de superfície como a rugosidade.

O AERMET calcula também os parâmetros da camada limite: comprimento de Monin-Obukhov, escalas de velocidade convectiva e de temperatura, velocidade de

fricção, altura de mistura e fluxo de calor. Estes valores são transferidos à interface meteorológica do AERMOD através de dois arquivos: *aermet.pfl* e *aermet.sfc*, que são utilizados na determinação do coeficiente de turbulência vertical e lateral, do perfil vertical de velocidades do vento e do gradiente de temperaturas, usados pelo AERMOD nos cálculos da dispersão atmosférica de poluentes (EPA, 2004b).

O AERMET requer, como dados de entrada, velocidade e direção do vento e temperatura próximos da superfície, assim como informações das características da superfície, cobertura de nuvens, dados de temperatura de altitude. Com estes dados o modelo calcula a velocidade de fricção, o comprimento de Monin-Obukov, a velocidade convectiva, a escala de temperaturas, a altura de mistura e o fluxo de calor. (CIMORELLI *et al*, 2004b).

Conforme em EPA (2004b), os dados mínimos exigidos para que o AERMET realize processamento dos dados e retorne com os dois arquivos de entrada do AERMOD são observações horárias da superfície e dados de sondagens da atmosfera. Sendo que os dados de sondagem atmosférica, quando inexistentes, podem ser estimados pelo AERMET através dos dados de superfície disponíveis.

As informações de superfície devem contemplar dados de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente ou temperatura de bulbo seco, cobertura de nuvens, ou, na ausência desta, cobertura total do céu. A pressão atmosférica é recomendada, mas não exigida, pois na ausência desse dado, o AERMET utiliza como valor padrão, a pressão média no nível do mar de 1013,25 milibars. (EPA, 2004b).

O AERMET tem a capacidade de processar diferentes formatos de dados, como, por exemplo, os formatos SCRAM (*Support Center for Regulatory Models*), CD144 (*Card Deck 144 format*), e SAMSON (*Solar and Meteorological Surface Observation Network*). O formato SAMSON foi o escolhido para uso na pesquisa.

O AERMET produz dois arquivos de dados de saída (*aermet.sfc* e *aermet.pfl*) que são utilizados como dados de entrada do AERMOD. O arquivo de dados *aermet.sfc* apresenta os dados meteorológicos de superfície, enquanto o arquivo *aermet.pfl* contém informações relativas aos parâmetros da camada limite, calculados pelo AERMET. Informações mais detalhadas sobre os formatos dos arquivos de entrada do modelo AERMOD podem ser obtidos em EPA (2004b, 2004c).

3.8.2 Descrição do pré-processador AERMAP

O pré-processador AERMAP foi desenvolvido para pré-processar os dados de terreno planos até aqueles ditos complexos (montanhosos), levando em conta a localização dos receptores e das fontes visando fornecer ao AERMOD informações do terreno a ser utilizado nas simulações.

Os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos aplicáveis a terrenos planos ou complexos requerem informações sobre o tipo de terreno, visto poder interferir no resultado de concentração de um determinado poluente sobre um receptor qualquer. Desta forma, as principais funções do AERMAP são a determinação da elevação da base das fontes e dos receptores, fornecendo estas informações ao AERMOD para posterior cálculo da concentração de poluentes. (EPA, 2004c)

O AERMAP requer como dados de entrada a localização das fontes e dos receptores e um arquivo com informações topográficas do terreno, que pode ser encontrado em formato do Modelo Digital de Terreno (MDT) Thé (2011a).

Dos vários formatos de dados MDT, o AERMAP é programado para ler, entre outros, o formato SRTM que é disponibilizado pela *United States Geological Survey - USGS*. O arquivo SRTM consiste em uma malha de aproximadamente 90m por 90m (na linha do equador), contendo os dados de elevação de terreno, onde se deve plotar as fontes e os receptores Thé (2011b).

Os dados de saída do AERMAP são informações de entrada do AERMOD para localizar as fontes de emissão de poluentes e os receptores, ou seja, os lugares onde se deseja obter a concentração dos poluentes. Assim, o produto do AERMAP é um arquivo de dados de saída que contém informações das fontes e dos receptores, incluindo altura da base das fontes EPA (2004d).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

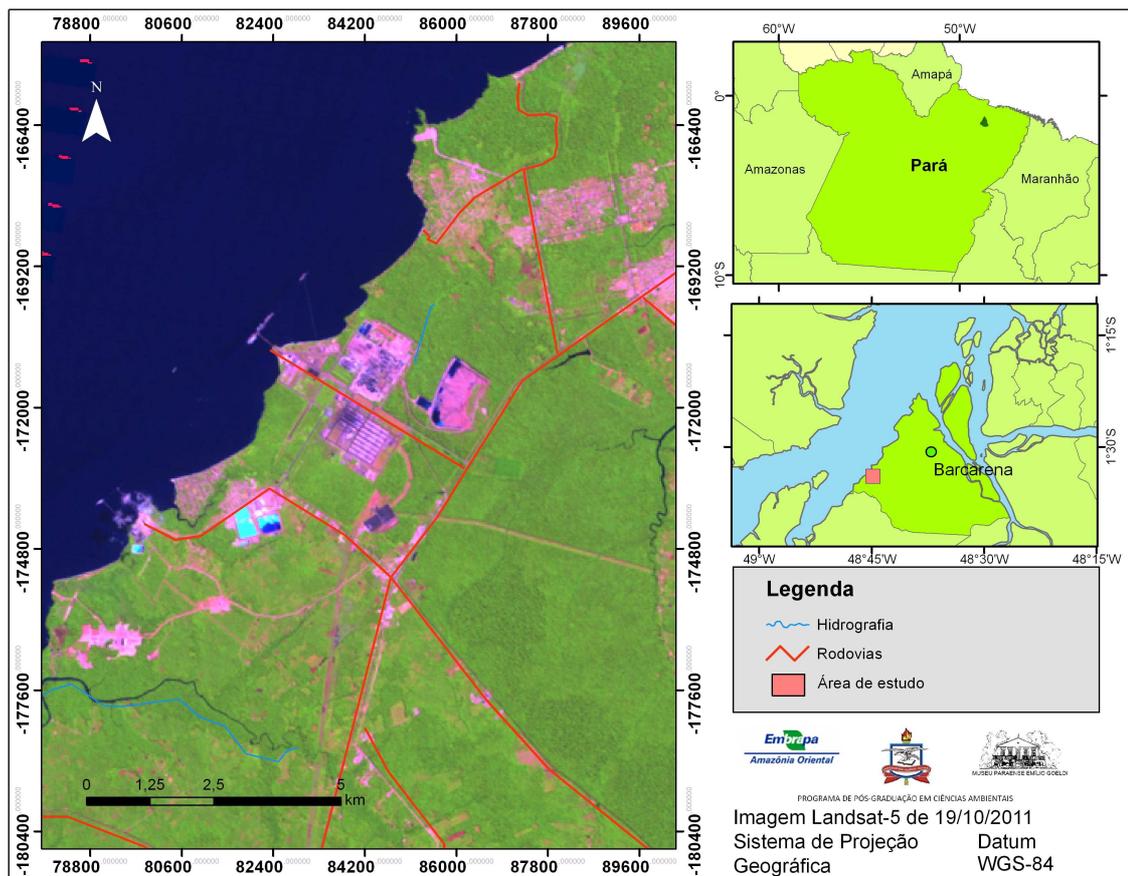
A área alvo do estudo localiza-se em Barcarena, na região onde estão instaladas as maiores indústrias do município, também conhecida como Distrito Industrial (Figura 7).

O município de Barcarena situa-se na mesorregião metropolitana de Belém com população de 94.641 (IBGE, 2010). A sede municipal esta sob as coordenadas 01°30'24" de latitude sul e 48°37'12" de longitude a oeste de

Greenwich. Tem cerca de 1.316, 2 km², distando aproximadamente 30 km em linha reta da cidade de Belém (PARÁ, 2011).

O município de Barcarena é limitado ao norte pela baía de Guajará e baía do Marajó. A oeste é limitado em toda a sua porção pela baía do Marajó, seu principal acidente hidrográfico. Ao sul tem seus limites pelos municípios de Moju e Abaetetuba e a leste pela baía de Guajará e município de Acará (PARÁ, 2011).

Figura 7 – Mapa de localização da área alvo da pesquisa.



Atualmente a vegetação predominante na região é composta de florestas secundárias (capoeiras) em diferentes estágios sucessionais de regeneração. Ao longo das margens dos rios e igarapés, sobressaem as florestas ciliar e de várzea nos trechos sob influência de inundações (PARÁ, 2011).

O Município de Barcarena apresenta níveis topográficos pouco elevados, sobretudo nas áreas sujeitas a inundações. Na porção continental, a topografia é um pouco mais elevada com altitude de 14 metros (PARÁ, 2011).

Em 1985, a implantação do complexo industrial ALBRAS - ALUNORTE em Barcarena para a produção de alumínio desencadeou aumento populacional do município e a degradação de áreas naturais de florestas e corpos hídricos. Grandes

áreas tiveram que ser desapropriadas para a construção das plantas industriais e dos núcleos residenciais (Vila do Conde e Vila dos Cabanos) (MONTEIRO, 2005).

Na área industrial de Barcarena localizam-se diversas empresas, dentre as quais se destacam: ALBRAS, ALUNORTE, Porto de Vila do Conde, Imerys Rio Capim Caulim, Pará Pigmentos S.A. Além de outras que se encontram em fase de instalação no local.

Existem ainda em espaços próximos da área do Distrito Industrial aglomerações humanas, onde as comunidades do Curuperé, Acuí, Núcleo da Vargem, residencial Dom Manuel e o Distrito de Vila do Conde são as principais, conforme Figura 8. Segundo SEMA (2007a) as citadas comunidades estão na área de influência das emissões atmosféricas originadas na área industrial em questão. Tendo como referência o ano de 2007, as comunidades do Curuperé, Acuí, Núcleo da Vargem e residencial Dom Manuel e Vila do Conde apresentam população aproximada de 12.800 pessoas, conforme CVRD/DELPHI (2007) e Rodrigues (2008).

Figura 8 – Layout geral da área alvo da pesquisa.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2011)

4.2 DADOS TOPOGRÁFICOS E METEOROLÓGICOS

Os dados de topografia da região de Barcarena, representados por curvas de nível de vários pontos da área pesquisa, foram inseridos no sistema do modelo de dispersão em formato txt. Esses dados foram obtidos do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)² que possui curvas com resolução de 90 metros para regiões do planeta Terra fora dos Estados Unidos, com dados de altitude (h) em metros inteiros e considera o World Geodetic System 1984 (WGS 84) como elipsóide de referência. A pesquisa também utilizou visadas do Google EarthTM, ano 2011, para compor o sistema de imagem das plumas de dispersão, objetivando propiciar melhor visualização espacial das plumas sobre a paisagem local.

Posteriormente os resultados das simulações (plumas e isolinhas de concentração dos poluentes) foram exportados para o Google EarthTM, onde foram alocadas automaticamente sobre uma imagem aérea georreferenciada da região das fontes, considerada como sendo a área de influência das emissões atmosféricas.

Os dados meteorológicos (precipitação, temperatura, velocidade e direção do vento) utilizados no estudo foram obtidos de três estações de superfície localizadas nos municípios de Abaetetuba, Barcarena e Belém foram repassados pelo SIPAM e Diretoria de Recursos Hídricos da SEMA. As características básicas e períodos de dados usados estão apresentados a baixo.

A estação de Abaetetuba está localizada sob a latitude $01^{\circ}45' 1,0''S$ e longitude $48^{\circ}52'1''W$, na altitude de 10 metros sobre o nível do mar, pertence à Agência Nacional de Água (ANA) sendo operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Os dados utilizados foram para o período de 1981 a 2010.

A estação de Barcarena localiza-se em Vila do Conde (latitude $01^{\circ}33'56''S$ e longitude $48^{\circ}46'1,0''W$, na altitude de 13 metros), também da ANA e operada pela CPRM. Os dados disponibilizados foram para os períodos de 1981 a 2010 e 2003 a 2010.

A estação de Belém, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localiza-se sob a latitude $01^{\circ}24'37,08''S$ e longitude $48^{\circ}26'17,88''W$, na altitude de 24 metros, e os dados cobrem o período de 2008 a 2010.

² Em fevereiro do ano 2000, a National Aeronautics and Space Administration (NASA) realizou, através do SRTM, o levantamento topográfico de toda a superfície terrestre com objetivo de obter modelos digitais de elevação (MDE) da Terra.

A necessidade de utilizar os dados das três estações objetivou atender duas necessidades da pesquisa:

- a primeira esta relacionada ao preenchimento de eventuais falhas identificadas para os dados de precipitação, no período de 1981 a 2010, e para as demais variáveis meteorológicas no período de 2003 a 2010, onde foram utilizados dados das estações de Abaetetuba e Barcarena.

- a segunda esta pautada no preenchimento de eventuais falhas e na exigência do modelo AERMOD View de dados horários (mínimo 8.760 horas) para os seguintes parâmetros meteorológicos: vento (velocidade e direção), pressão atmosférica, temperatura, umidade, radiação e cobertura de nuvens, informações disponíveis somente na estação de Belém.

O intervalo mínimo de um ano de dados horários é necessário para que o modelo possa agregar em suas equações internas as características meteorológicas típicas de todas as estações do ano.

Ressalta-se que a distância entre o local de aquisição dos dados (Belém) em relação e a área de execução da modelagem (Barcarena) é pequena (cerca de 30 km). Considerando ainda a semelhança de características morfológicas, como relevo plano e a presença de grandes massas d'água é possível inferir que o regime de ventos em Barcarena seja similar ao que ocorre em Belém.

Para preenchimento de eventuais falhas, utilizou-se um método dos mínimos quadrados para efetuar a correlação entre os bancos de dados das estações de Abaetetuba e Barcarena. Exclusivamente para o parâmetro precipitação, foi selecionado o período de 1981 a 2010, correspondente a uma série histórica de 30 anos, coincidente com o período de dados disponível nas citadas estações.

Para as demais variáveis meteorológicas obtidas na estação de Barcarena e Belém, em função da disponibilidade de informações, foram utilizados dados do período de 2003 a 2010 e 2008 a 2010, respectivamente.

Assim, os dados foram analisados separadamente em três períodos, de 1981 a 2010 (precipitação), 2003 a 2010 (temperatura, velocidade e direção do vento) e de 2008 a 2010 (velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, temperatura, umidade, radiação e cobertura de nuvens).

A partir dos dados tabulados, foram calculadas as médias mensais, anuais e normalizadas, desvio padrão e o coeficiente de variação para as médias e totais.

Para a análise da variabilidade, utiliza-se também o desvio normalizado pelo desvio padrão, que é a diferença entre a variável e sua média, dividida pelo desvio padrão. Esse cálculo informa, em termos do desvio padrão, o valor da anomalia (positiva ou negativa). Matematicamente, o desvio normalizado (Z) é expresso por:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{dp} \quad (10)$$

O coeficiente de variação (Cv) é útil na dispersão dos dados, pois trata de uma média relativa de variabilidade para a comparação do grau de concentração em torno da média de séries distintas. Ou seja, é o desvio padrão expresso como uma porcentagem da média. Assim, a quantidade Cv é um número adimensional e representa o desvio-padrão que seria obtido se a média fosse igual a 100. O Cv pode ser expresso matematicamente por (OLIVEIRA, 1999):

$$Cv = \frac{dp}{\bar{X}} \times 100 \quad (11)$$

4.3 FONTES EMISSORAS

A seleção das fontes emissoras de poluentes atmosféricos, bem como a quantificação e qualificação das emissões, constituem-se em subsídio fundamental para o desenvolvimento das simulações de dispersão pretendida. A partir dessas informações, devidamente consistidas, foi realizada a alimentação do modelo matemático de dispersão empregado para a determinação do impacto (contribuições) dessas fontes na qualidade do ar da região de interesse.

A modelagem de dispersão foi realizada considerando um conjunto de fontes fixas (chaminés) situadas na área do distrito industrial de Barcarena/PA. Figura 8.

O conjunto de fontes é composto por cinco chaminés com alturas que variam de 7 a 35 metros integrantes de dois grupos geradores de energia elétrica, uma caldeira e dois secadores que utilizam combustíveis fósseis como fonte energética. Maiores detalhes sobre as fontes constam na Tabela 9 - Características físicas e localizações das fontes fixas emissoras utilizadas nas simulações

Ressalta-se que a localização das fontes emissoras é hipotética, pois nas coordenadas onde foram posicionadas, atualmente não existe em operação qualquer tipo de atividade. Desta forma, as citadas fontes podem, em relação à condição futura, ser consideradas integrantes de um empreendimento futuro e

consequentemente os valores simulados, serem contribuições às fontes existentes na região do Distrito Industrial de Barcarena.

A justificativa para este procedimento foi a dificuldade encontrada na obtenção das informações relativas à emissão de gases e às características físicas das chaminés junto às indústrias localizadas no distrito industrial de Barcarena que inviabilizaram o uso de dados reais de emissões de empreendimentos que operam na região de Barcarena.

A dispersão das emissões foi avaliada em uma grade de receptores, com abrangência equivalente a 570 km² para área simulada. As variáveis básicas que caracterizam as chaminés e usadas como dados de entrada no *software* de simulação utilizado são: coordenadas geográficas da fonte de emissão; altitude na base da fonte de emissão; altura física da fonte de emissão; e diâmetro interno da fonte de emissão na saída da chaminé, apresentando unidade de medida em metro. A Tabela 9 - Características físicas e localizações das fontes fixas emissoras utilizadas nas simulações apresenta maiores detalhes das fontes emissoras.

4.4 DADOS DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

As propriedades das emissões atmosféricas utilizadas nas simulações foram estimadas a partir de fatores de emissão característicos de atividades produtivas que operam na área industrial de Barcarena e são apresentadas na Tabela 9. Foram consideradas para as modelagens somente as fontes fixas indicadas na citada tabela, desconsiderando as fontes móveis, fontes fugitivas e do Distrito Industrial.

As variáveis que caracterizam as emissões atmosféricas, e que foram utilizadas como dados de entrada no *software* AERMOD são: taxa de emissão do poluente estudado (g/s); temperatura dos gases na saída da chaminé (K); velocidade dos gases na saída da chaminé (m/s).

As características de emissões apresentadas na tabela 9 foram selecionadas a partir de informações obtidas das documentações de estudos ambientais (CVRD/DELPHI, 2007) e relatórios de monitoramento ambiental (SEMA, 2007a; RAMOS ; FALAGUASTA, 2010) de indústrias que operam em território paraense, além da consulta de dados de emissões constantes em literatura especializada (LORA, 2002).

Tabela 9 - Características físicas e localizações das fontes fixas emissoras utilizadas nas simulações
 Fonte: Adaptado de Lora (2002); Ramos e Falaguasta (2010).

FONTES	LOCALIZAÇÃO DAS FONTES			CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES				TAXAS DE EMISSÃO	
Descrição	Coordenadas (UTM)		Elevação Nível do Mar (m)	Altura da Chaminé (m)	Temperatura dos Gases (K)	Velocidade dos Gases (m/s)	Diâmetro Chaminé (m)	MP (g/s)	SO₂ (g/s)
	X (m)	Y (m)							
(F1) Gerador 3,75 MW	751334.11	9826718.92	25,25	12	710,03	16,80	0,95	0,221	0,46
(F2) Gerador 4,5 MW	751234.23	9826569.05	27,28	20	716,28	22,05	0,95	0,17	0,54
(F3) Caldeira	751434.50	9826339.40	28,54	7	510	11,5	0,25	0,16	1,165
(F4) Secador de Caulim 1	751534.81	9826500.29	29,00	35	340,45	14,68	1,8	1,23	0,9055
(F5) Secador de Caulim 2	751641.13	9826670.39	28,64	35	350,08	14,63	1,8	1,82	0,35

As simulações foram realizadas para os seguintes poluentes: Material Particulado, analisado como material particulado menor que 10 μm (MP_{10}) e Dióxido de Enxofre (SO_2).

A escolha dos poluentes (MP_{10} e SO_2) justifica-se pela significância de suas emissões nas tipologias de fontes das atividades produtivas existentes no Distrito Industrial de Barcarena. Assim como, serem considerados convencionais e/ou regulamentados pela resolução CONAMA 03/1990 (que estabelece padrões primários e secundários de qualidade do ar a serem obedecidos na região de estudo), além de serem precursores da formação de poluentes secundários na atmosfera.

4.5 DADOS DA QUALIDADE DO AR

A caracterização da qualidade do ar teve por base as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA que tratam do assunto (Resoluções CONAMA Nº 05/89, 03/90, 08/90 e 382/06), informações constantes em pareceres e notas técnicas sobre qualidade do ar do Distrito Industrial de Barcarena elaboradas pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará – SEMA, assim como dados da qualidade do ar de estações de monitoramento localizadas no município de Barcarena.

As estações de qualidade do ar são operadas conjuntamente pela ALUNORTE e ALBRAS que enviam, trimestralmente, os dados de monitoramento à SEMA. Na Figura 7 deste trabalho as estações de qualidade são nomeadas como Estação de Qualidade do Ar do Distrito Industrial – EDI e Estação de Qualidade do Ar de Vila do Conde – EVC, sob as coordenadas indicadas a seguir EVC: 748454.33 E, 9826826.31 S e EDI: 750564.56 E, 9826638.27 S.

Nesta etapa da pesquisa foram selecionados, para análise e interpretação, dois tipos de poluentes, o Partículas e Dióxido de Enxofre (SO_2) com dados de monitoramento a partir das séries temporais, para o período de janeiro de 2006 a dezembro de 2011.

O monitoramento dos poluentes escolhidos para análise é executado por dois tipos de equipamentos. O amostrador de grande volume (HI-Vol) usado para partículas e o analisador de gases para Dióxido de Enxofre, com método de amostragem estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90, com periodicidade

contínua para SO₂. Para as partículas as medições ocorrem, uma vez com duração de 24 horas, a cada intervalo de cinco dias no mês.

Foi avaliado o atendimento aos padrões de qualidade do ar da região alvo da pesquisa, através de comparação entre as concentrações observadas para Partículas e Dióxido de Enxofre e os valores estabelecidos na Resolução CONAMA 03/90, que institui os padrões de qualidade do ar no Brasil.

Por fim, foi realizado o enquadramento da qualidade do ar de Vila do Conde e área do Distrito industrial de Barcarena de acordo com metodologia do Índice de Qualidade do Ar – IQA, adotados em outros estados do Brasil que realizam monitoramento da qualidade do ar em seus territórios.

4.6 MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES

O modelo de dispersão utilizado neste estudo é o software AERMOD View versão 7.3.0 da Lakes Environmental Consultants, Inc. Ontário-Canadá. As características técnicas selecionadas no software para as modelagens desta pesquisa foram as seguintes:

- Área: Rural;
- Receptores; Área de influência da atividade industrial representada por sistema de coordenadas Cartesianas (x, y), considerando a elevação de cada ponto do receptor, em relação ao nível do mar;
- Dados Meteorológicos; dados reais para o ano 2010;
- Resultados das concentrações de poluentes: Primeira Máxima para períodos de 24 horas e anual; e
- Poluentes: Material Particulado (MP₁₀) e Dióxido de Enxofre - SO₂.

Como fontes emissoras de poluentes atmosféricos foram selecionadas cinco chaminés. As variáveis técnicas que caracterizam as fontes emissoras (chaminés) usadas como dados de entrada no AERMOD View são as seguintes: coordenadas geográficas da fonte; altitude na base da fonte; altura física da fonte; diâmetro interno da fonte na saída da chaminé. Maiores detalhes das fontes emissoras utilizadas estão descritas na tabela 9.

Os dados meteorológicos utilizados são reais, para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2010, totalizando 8.760 horas de informações, onde foram utilizados os seguintes parâmetros: direção (graus) e velocidade do vento (m/s), temperatura ambiente (C°), cobertura de nuvens (décimo), Monin-Obukov e pressão

barométrica que foram inseridos no AERMET, responsável por processar e preparar os arquivos meteorológicos nos formatos (*.sfc e *.pfl) que foram utilizados como dados de entrada, no formato SAMSON, no AERMOD View. O arquivo com a extensão (*.sfc) apresentaram os dados meteorológicos de superfície, enquanto o arquivo (*.pfl) contém informações relativas aos parâmetros da camada limite, calculados pelo AERMET.

Os dados de topografia da região de Barcarena foram inseridos no pré-processador AERMAP, responsável por processar os dados de terreno, visando determinar a elevação de base das fontes e dos receptores para posterior cálculo da concentração de poluentes pelo AERMOD.

O AERMAP requereu como dados de entrada, no formato *.txt, a localização das fontes e dos receptores. Foi necessário um arquivo com informações topográficas da região de estudo, adquirido da *United States Geological Survey – USGS*, no formato SRTM, onde foram plotadas as fontes e os receptores.

Os dados de saída gerados pelo AERMAP são dados de entrada do AERMOD para fixar os lugares onde se deseja obter a concentração dos poluentes. Esses dados contêm informações das fontes e dos receptores, incluindo altura da base das fontes.

Dentre as saídas de concentração de poluentes oferecidas pelo AERMOD View, neste estudo, foram utilizadas as seguintes:

- Concentrações Médias Máximas de 24 Horas de MP e SO₂. Considerando a entrada de dados meteorológicos horários, o software calculou as concentrações horárias dos poluentes em cada ponto receptor predefinido.

A partir destes resultados, foi calculada a concentração média de cada 24 horas, para todos os receptores. O arquivo de saída do *software* apresenta, para cada ponto receptor e dentre todos os dias calculados, o dia, a hora e o local onde foi encontrada a maior média de 24 horas da concentração. Esta saída permite que se faça uma avaliação dos resultados quanto ao padrão de média de 24 horas previsto na legislação ambiental aplicável.

- Concentrações Médias Máximas Anual de MP e SO₂. Considerando a entrada de dados meteorológicos horários, o *software* calculou as concentrações horárias dos poluentes em cada ponto receptor predefinido durante todo o ano de 2010.

A partir destes resultados, foi calculada a concentração média em cada ponto receptor considerando todos os dados meteorológicos horários registrados no arquivo de dados. O arquivo de saída do *software* apresenta a média geral da concentração em cada ponto receptor. Esta saída permite que se faça uma avaliação dos resultados quanto ao padrão de média anual previsto na legislação ambiental em vigor.

4.6.1 Definição da área de influência das plumas de poluentes

Para o levantamento da área potencialmente influenciada pela atividade industrial simulada, estabeleceu-se um sistema de coordenadas cartesianas, tendo como origem as fontes fixas (chaminés) do empreendimento (hipotético). Os pontos receptores definidos, foram utilizados pelo AERMOD View como os locais para os quais são apresentados os resultados da saída do programa.

Adotando-se um sistema de coordenadas cartesianas, foi desenvolvida uma malha topográfica abrangendo aproximadamente de 570 km².

Os pontos definidos foram distanciados entre 1193,94m (x) e 1191,92m (y) em todas as direções, totalizando 441 pontos receptores. Esta malha foi definida em função da disponibilidade de dados de topografia no entorno das fontes e procurando cobrir a maior parte possível da suposta área de influência das emissões. As coordenadas iniciais dos pontos extremos de SW foram 739421.57E e 9814688.43S.

4.7 AVALIAÇÃO SOCIAL DAS ÁREAS AFETADAS PELOS POLUENTES

Para elaboração desta fase da pesquisa foi identificado as principais aglomerações humanas situadas próximas ao distrito industrial e sua relação com os ambientes potencialmente impactados pela poluição atmosférica. Este diagnóstico obedeceu a critérios sociais (densidade populacional, uso do solo e infraestrutura) e suas relações com os ambientes naturais onde residem e/ou desenvolvem suas atividades.

Para o desenvolvimento desta etapa foram realizadas as seguintes atividades:

- Levantamento bibliográfico em dissertações, estudos ambientais, relatórios de monitoramento ambiental da área e documentos relacionados ao tema da pesquisa.

- Análise de imagens do Google Earth™ georeferenciadas do ano 2011. O diagnóstico abrangeu para melhor visualização espacial a área industrial e Vila do Conde e as comunidades do entorno do distrito industrial.
- Trabalho de campo, através de visitas em Vila do Conde e área de entorno do distrito industrial em 25 de agosto e 23 de novembro de 2011 e 16 de janeiro de 2012; foram realizadas entrevistas informais com técnicos das empresas que operam no local e servidores públicos que trabalham na região; levantamento dos aspectos sociais da Vila do Conde e Acuí, Curuperé, residencial Dom Manuel e o núcleo da Vargem por intermédio de encontros com lideranças locais e moradores. Levantamento das infraestruturas (distribuição de água e energia, postos de saúde, etc.) disponível e identificação das Instituições locais; assim como observações e registros fotográficos da área.

Para identificação das fraquezas sociais utilizou-se os seguintes critérios: (i) o posicionamento geográfico, (ii) a densidade populacional, (iii) as infraestruturas existentes relacionada serviços públicos de saúde, água e energia e (v) o modo de ocupação do solo. As relações da população como as fragilidades dos ambientes naturais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta secção apresenta os resultados e discussões desta pesquisa e esta organizado em quatro subsecções. A subsecção 5.1 apresenta discussões sobre o clima e o comportamento temporal da temperatura, velocidade e direção do vento e precipitação na região de Barcarena. A subsecção 5.2 exhibe os resultados da qualidade do ar observada na área de influência do distrito industrial de Barcarena. A subsecção 5.3 expõe os resultados da modelagem de dispersão de poluentes para os períodos de simulações (24 horas e anual) discutindo os níveis de concentrações de poluentes, o alcance das plumas, os receptores impactados pelos poluentes, assim como o índice de qualidade do ar estimado para as áreas pesquisadas e a subsecção 5.4 apresenta as áreas afetadas pela poluição atmosférica e suas vulnerabilidades sociais.

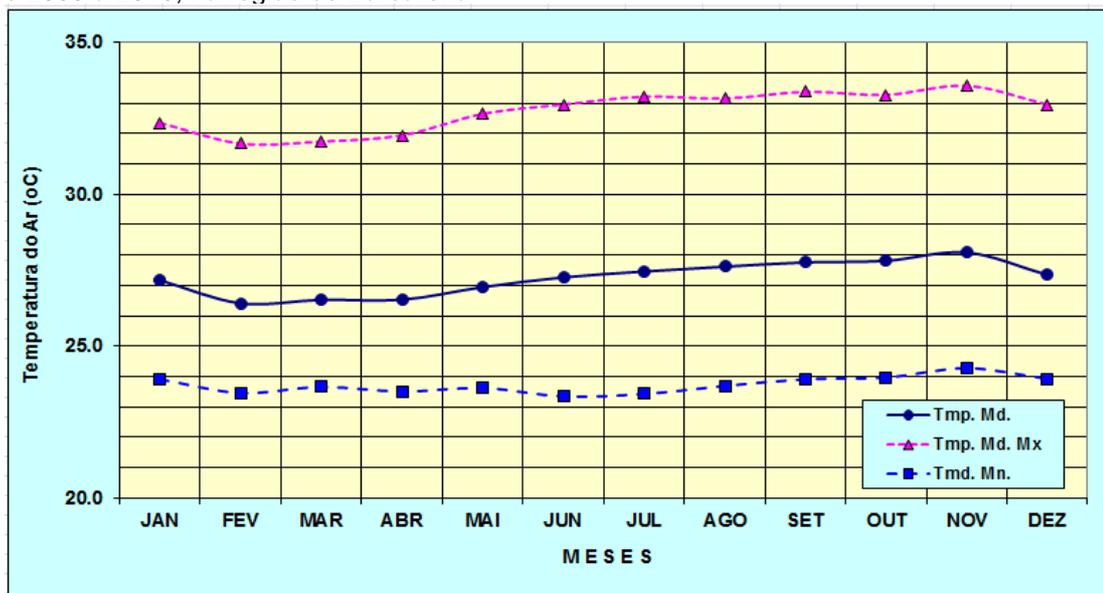
5.1 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

As principais variáveis meteorológicas da área de estudo que contribuem diretamente para a dispersão de poluentes atmosféricos são a temperatura, velocidade e direção do vento e precipitação.

5.1.1 Temperatura

A Figura 9 mostra a temperatura do ar considerando as médias mensais máximas, mínimas e compensadas (a média entre a temperatura máxima e mínima) no período de 2003 a 2010 na região de Barcarena. Observa-se que o trimestre mais quente ocorre de setembro a novembro, com temperatura mais alta da média das máximas da ordem de 33,6°C e o trimestre menos quente, fevereiro a abril, com a menor temperatura média das mínimas, acima de 23°C. A temperatura média compensada mais alta, do mês mais quente (novembro) é de 28,1°C e mais baixa do mês menos quente (fevereiro) de 26,4°C. Ressalta-se que os meses de maior temperatura coincidem com os de menor precipitação e o inverso para os meses menos quentes.

Figura 9 - Temperaturas (°C) médias (máximas, mínimas e compensadas), durante o período de 2003 a 2010, na região de Barcarena.



Para o período total analisado, a média anual das máximas foi de 32,7°C, com desvio padrão de 0,4°C. A média anual das mínimas foi de 23,7°C, com desvio padrão de 0,3°C. Já a média anual compensada foi de 27,2°C, com desvio padrão de 0,3°C.

Observa-se que Barcarena está localizada em uma região do estado do Pará considerada mais quente, com temperaturas variando entre 26,4°C e 28,1°C. Estes resultados são similares ao registrado na região por Menezes, Monteiro e Galvão (2010) que observaram valores oscilando entre 26,3°C a 26,8°C, ocasionado pelo maior tempo de insolação ao longo do estado, com valores de exposição anual entre 2.300 e 2.400 horas, ou seja, em média 100 dias de sol por ano.

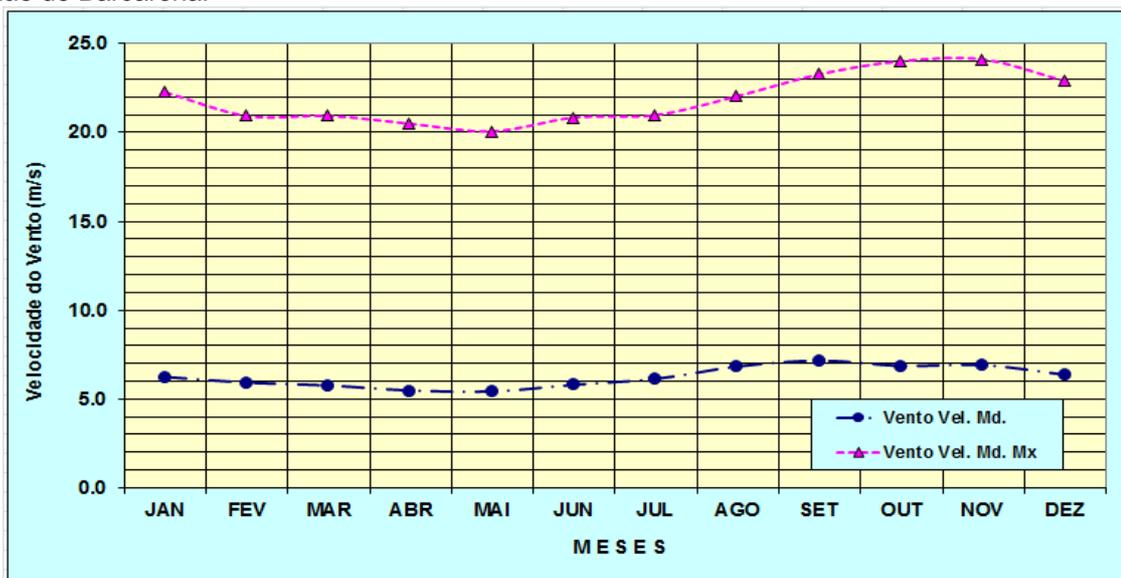
Os valores de temperatura observados para a região de Barcarena indicam altas temperaturas o que potencializa correntes de convecção na baixa atmosfera, assim contribuindo para uma boa dispersão de poluentes atmosféricos.

5.1.2 Velocidade e Direção do Vento

A Figura 10 mostra a velocidade do vento considerando as médias e máximas mensais no período de 2003 a 2010 na região de Barcarena. A velocidade média anual foi de 6,2 m/s, com desvio padrão de 0,1 m/s. A média das máximas de 21,9 m/s, com desvio padrão de 4 m/s.

A velocidade média (6,2 m/s) de Barcarena é superior à observada (4,3 m/s) na região Bragantina – PA por Silva Junior (2004) e duas vezes maior ao registrado no estado do Acre, onde os ventos são fracos com velocidades que não passam de 3 m/s Duarte (2006).

Figura 10 – Velocidade do vento (média e máximas) durante o período de 2003 a 2010, na região de Barcarena.



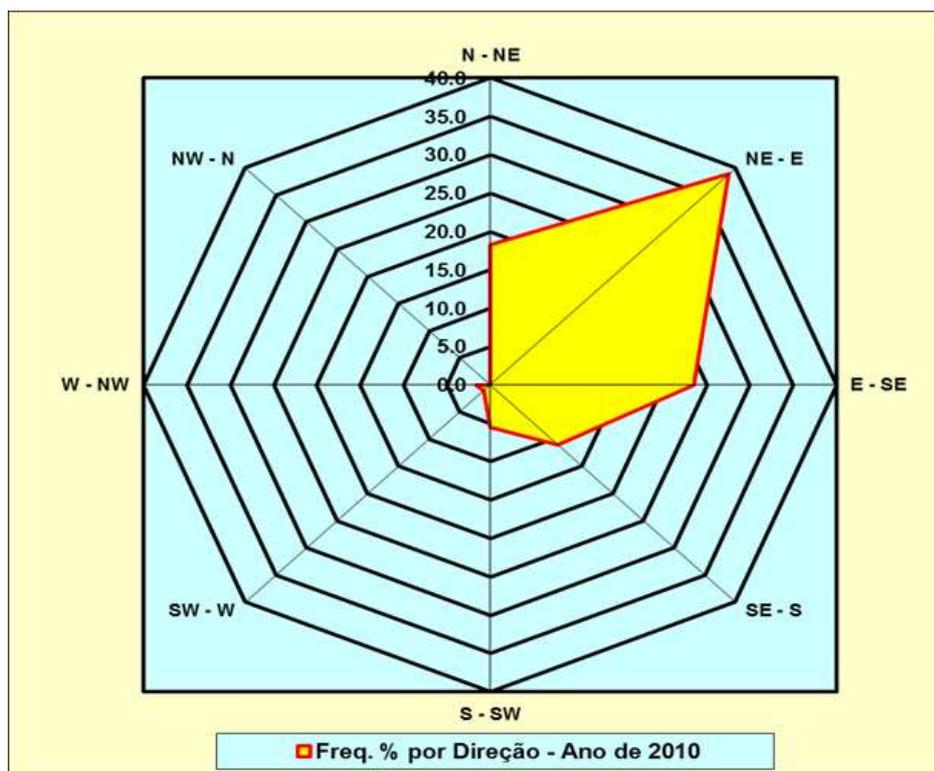
Na figura 10, observa-se que as velocidades médias mais altas (7,2 m/s) e a média das máximas (24 m/s) se manifestaram no período de estiagem (setembro a novembro) da região de Barcarena. Já os meses de abril e maio (período chuvoso) exibiram velocidades com valores médios menores, pouco acima de 5,0 m/s.

Com relação à diferença de ventos no período chuvoso e de estiagem, as velocidades de vento tenderam a diminuir no inverno e aumentar de valor no verão. Esta tendência de maiores velocidades de ventos no verão deve esta relacionada ao maior aquecimento do solo, o qual também aquece o ar, que ascende, sendo ocupado por um ar mais frio, gerando uma diferença térmica que, por sua vez, cria

um gradiente de pressão causando o deslocamento do ar da zona de maior pressão para de menor pressão, semelhante ao observado por Munhoz e Garcia (2008).

A direção predominante do vento na região de Barcarena é nordeste - este (NE - E) com 1.101 registros nesta direção, representando 39% da frequência total de 2.828. Os ventos de este-sudeste (E-SE) e norte-nordeste (N-NE) se apresentaram também muito frequentes durante todo o ano com média de 23,5% e 18,3%, respectivamente, Figura 11 e Tabela 10. Estes comportamentos dos ventos sugerem que os poluentes gerados no distrito industrial são direcionados para Vila do Conde e comunidades.

Figura 11 – Direção predominante do vento (frequência %) durante o ano de 2010, na região de Barcarena.



O comportamento da direção predominante do vento nas estações seca e chuvosa foi diferente, com menores frequências no mês de abril, e mais intensamente no mês de setembro. Já para as outras direções (E-SE e N-NE), não houve diferenças significativas no período chuvoso e de estiagem. Assim, nos meses mais secos da região de Barcarena a frequência de vento manifestada na orientação NE - E são mais intensas.

Tabela 10 - Frequências das direções do vento na região de Barcarena no ano 2010.

Dia	N - NE	NE - E	E - SE	SE - S	S - SW	SW - W	W - NW	NW - N
	0 a 44	45 a 89	90 a 134	135 a 179	180 a 224	225 a 269	270 a 314	315 a 359
Jan	30	100	51	36	13	2	8	0
Fev	27	90	65	24	9	2	3	0
Mar	49	91	62	20	16	3	3	0
Abr	38	57	37	43	38	5	9	0
Mai	48	61	54	40	23	6	7	0
Jun	39	51	59	62	13	1	3	0
Jul	41	88	67	26	9	4	5	0
Ago	55	116	44	16	4	0	1	0
Set	44	127	53	8	2	1	1	0
Out	53	109	69	9	2	1	2	0
Nov	49	122	41	11	9	1	0	0
Dez	44	89	63	17	18	4	5	0
CARACTERÍSTICAS MENSAIS								
Freq. Tot.	517	1101	665	312	156	30	47	0
Freq. (%)	18,3	38,9	23,5	11,0	5,5	1,1	1,7	0,0

5.1.3 Climatologia da precipitação

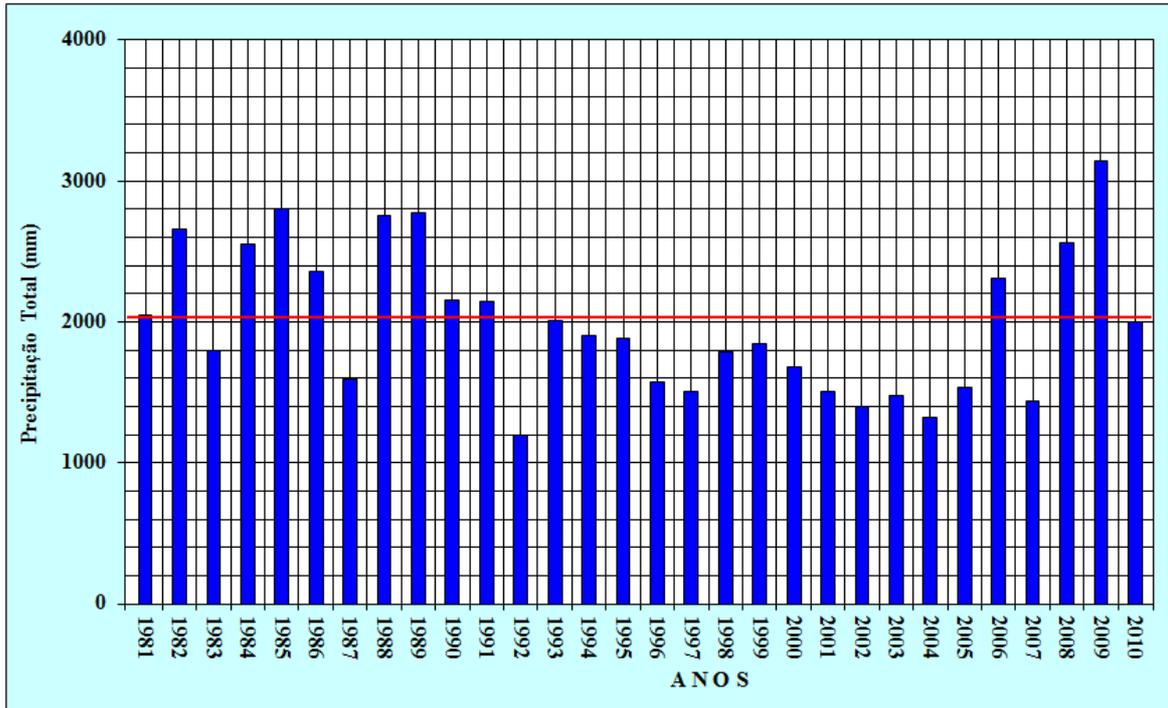
A Figura 12 mostra a precipitação anual acumulada, no período de 1981 a 2010 na região de Barcarena. A precipitação média anual para o período foi de 2.030 mm (linha em vermelho na figura 12), com desvio padrão de 530 mm e coeficiente de variação 26,0%. O valor médio da precipitação anual observado encontra-se próximo ao citado por Menezes, Monteiro e Galvão (2010), que variou de 1.900 a 2.300 mm anuais na região.

A média anual observada em Barcarena (2.030 mm) está abaixo da média anual de 2.400 e 3.330 mm que segundo Moraes (2005) predomina na faixa litorânea paraense, com penetrações para o continente, no eixo Belém-Tailândia, linha onde se localiza a região estudada.

Verifica-se para o período de 2001 a 2005 valores anuais de precipitação menores, com médias próximas de 1.500 mm, provavelmente influenciadas pela manifestação do El Niño³ na área. Este resultado alinha-se as verificações de Souza et al. (2000) e Fedorova e Carvalho (2006) que constaram níveis de precipitação abaixo da normal e secas no Norte do Brasil associadas ao fenômeno El Niño.

³ El Niño é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais no oceano Pacífico Tropical, capaz de afetar o clima regional e global, desta forma afetando os regimes de chuva em regiões tropicais. La Niña representa um fenômeno oceânico-atmosférico com características opostas ao EL Niño, caracterizado por um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical.

Figura 12 - Precipitação (mm) média total anual, durante o período de 1981 a 2010, na região de Barcarena.



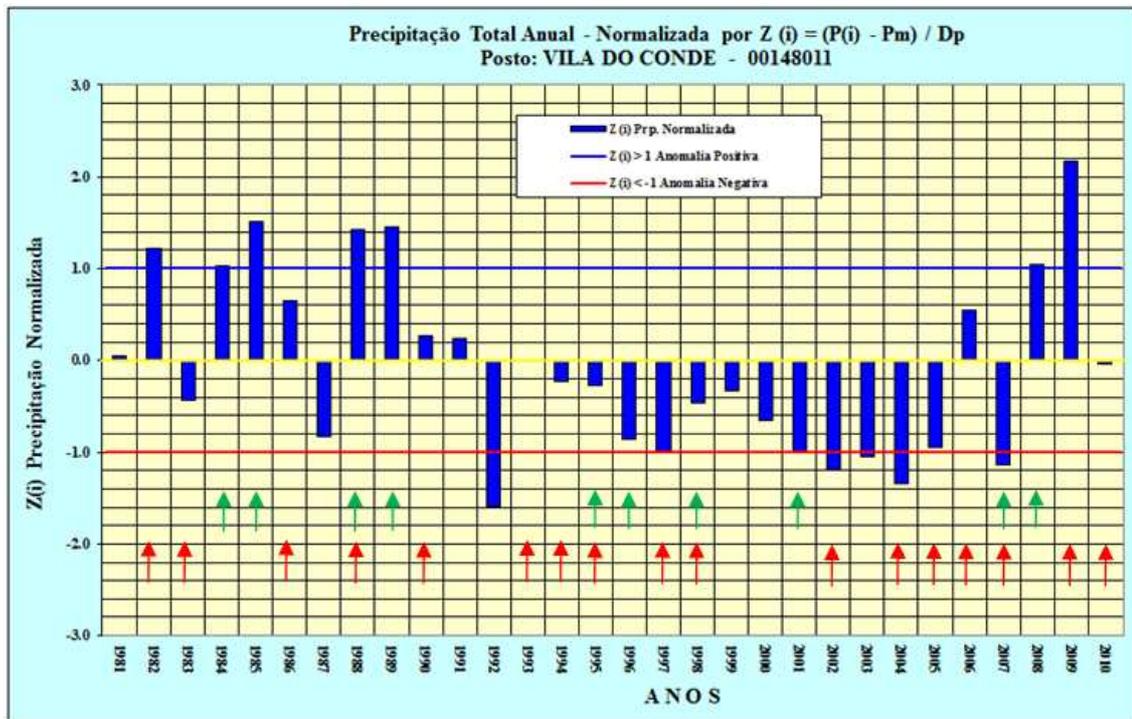
Para o período total estudado os índices pluviométricos da região de Barcarena ultrapassam 2.000 mm anuais em 43,3% do tempo. Considera-se que os altos índices de precipitação de Barcarena seja consequência da evapotranspiração da cobertura vegetal da região e de fluxos de vapor d'água trazidos do Oceano Atlântico segundo o observado por Marengo et al. (2001).

Para Bezerra e Cavalcanti (2008) a variabilidade das chuvas na região Norte na época chuvosa é diretamente influenciada pela temperatura de superfície do oceano tropical Atlântico que modula o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema causador de precipitação no Norte do Brasil, sendo que na Amazônia contribuí com aproximadamente 70% da precipitação.

A figura 13 apresenta a variabilidade interanual da precipitação, considerando o desvio anual, normalizado pelo desvio padrão. Verifica-se que até 1989 ocorreu uma predominância de anomalias positivas de precipitação anual e o inverso a partir de 1992 até 2007.

As anomalias positivas mais intensas (valores de desvio normalizados acima de 1) ocorreram nos anos de 1982, 1985, 1988 e 1989.

Figura 13 - Desvio anual normalizado da precipitação durante o período de 1981 a 2010 na região de Barcarena.

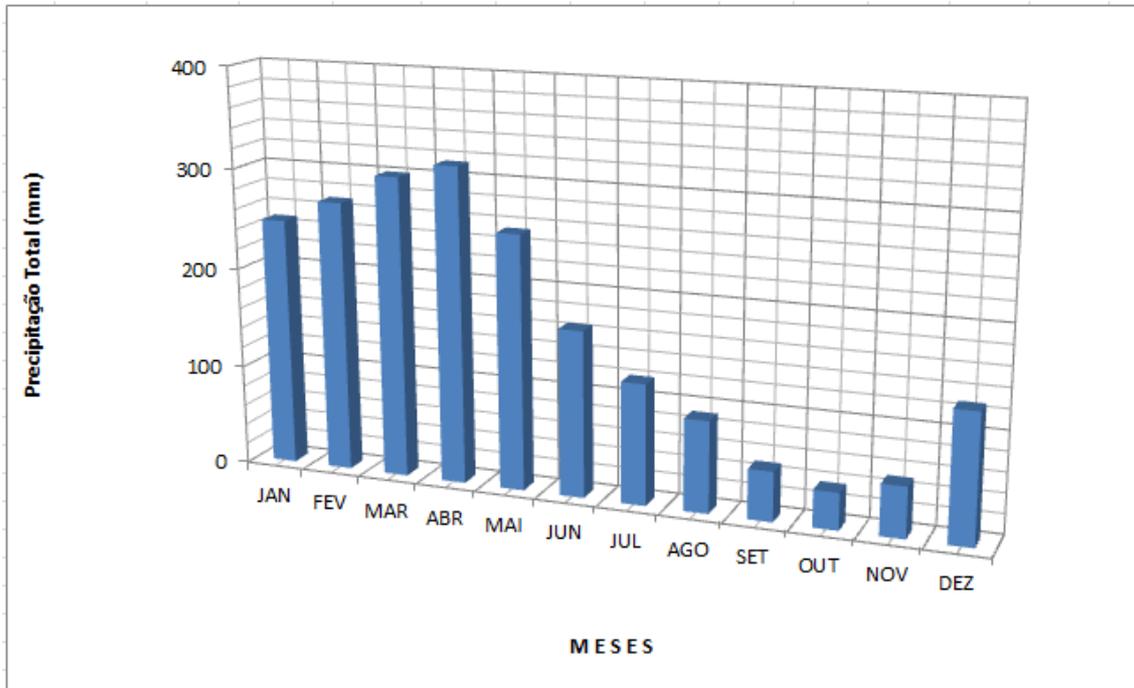


Legenda: Ano de El Niño →
 Ano de La Niña →

Quanto às anomalias negativas mais intensas destacam-se os anos de 1992, 2002, 2003, 2004 e 2007, onde alguns destes coincidem com os anos de El Niño (setas vermelhas) e La Niña (setas verdes) para o período estudado (figura 13), conforme informações disponíveis no site (<http://enos.cptec.inpe.br>) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Sobre tais fenômenos Souza et al. (2000) e Santos (2011) asseveram que a influência do fenômeno La Niña tende a favorecer a precipitação na Região Amazônica e o El Niño a inibi-la.

A Figura 14 mostra o ciclo anual da precipitação na região de Barcarena, considerando as médias mensais durante o período de 1981 a 2010. Fica evidente maior ocorrência de precipitação nos meses de janeiro a maio, com valores pluviométricos acima de 240 mm mensais, caracterizando o período chuvoso da região. Os meses que apresentam volumes de precipitação mais elevados são março (299,6 mm) e abril (314,3 mm). Os meses de maior precipitação estão nos intervalos de meses (novembro a maio) e (fevereiro a abril), observados, respectivamente, por Moraes (2005) e Menezes, Monteiro e Galvão (2010) como o mais chuvoso no nordeste do estado do Pará.

Figura 14 – Precipitação média mensal durante para o período de 1981 a 2010 na região de Barcarena.



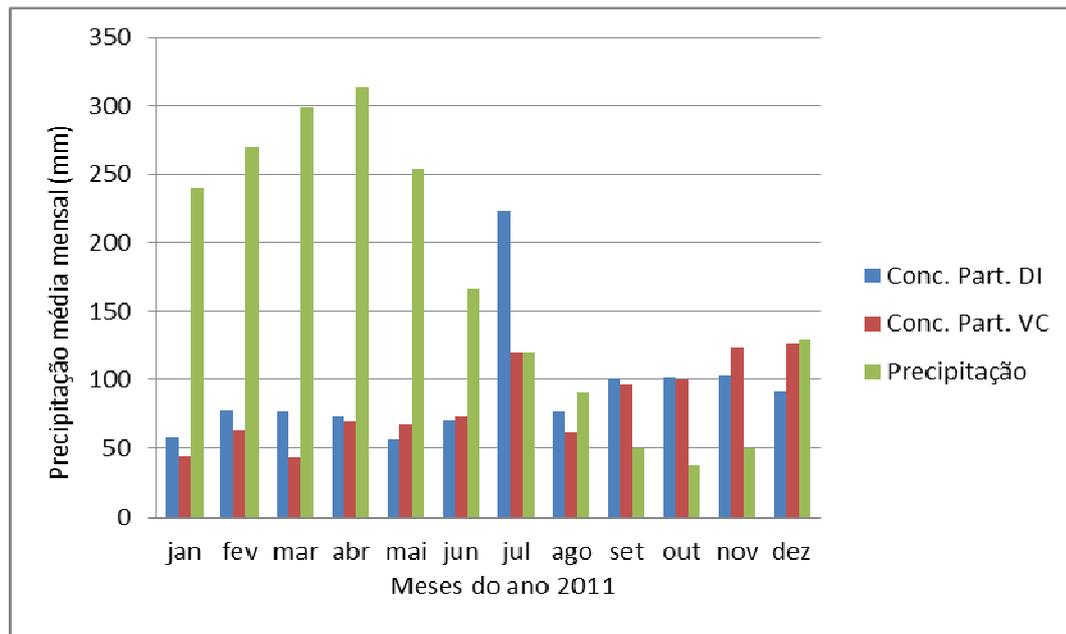
No que concerne ao período do ano mais seco, verifica-se que o trimestre setembro/outubro/novembro é o mais representativo. Tal observação é muito próxima da feita para a região por CVRD/DELPHI (2007) indicando o intervalo de agosto a novembro e Menezes, Monteiro e Galvão (2010), onde afirmam serem os trimestres de agosto a outubro e outubro a dezembro como os períodos menos chuvosos.

Assim, a variabilidade temporal da precipitação na área de Barcarena apresenta dois períodos distintos, um de maior pluviosidade que compreende os meses janeiro a maio, estação chuvosa e um de menor pluviosidade de agosto a dezembro, estação menos chuvosa, este resultado é similar ao observado por Costa (2006) para a região Amazônica.

A determinação dos meses (janeiro a abril) com maior índice de precipitação na área estudada é importante para a pesquisa, pois está diretamente associado ao processo de deposição úmida, por ser um fenômeno com capacidade de diminuir as concentrações de poluentes atmosféricos. Com importância equivalente, a identificação dos meses (setembro a novembro) com menor precipitação, visto a ausência de chuva contribuir para o aumento da concentração de poluentes na atmosfera.

A figura 15 apresenta os valores da precipitação dos meses de 2011 relacionados à concentração de partículas na área industrial de Barcarena e Vila do Conde. Nota-se que os meses menos chuvosos apresentam aumento na concentração de partículas, principalmente no trimestre de setembro a novembro.

Figura 15 – Relação entre os eventos de precipitação e as concentrações de partículas na área industrial de Barcarena e Vila do Conde no ano 2011.



Avaliando a precipitação no período de amostragem e as concentrações de partículas nas duas estações, verifica-se que em dias menos chuvosos os valores observados para o poluente em tela são maiores. Assim, as baixas concentrações de partículas podem estar relacionadas aos mecanismos de remoção úmida. Isso é apoiado por Tresmondi (2008) quando afirma que entre os mecanismos de remoção de material particulado da atmosfera está a precipitação pluviométrica.

Verificou-se, portanto, uma aparente sazonalidade nas concentrações de partículas em ambas as estações de monitoramento da qualidade do ar, com tendência a menores valores de concentração, no período chuvoso, e o oposto, no período de estiagem (verão) da região de Barcarena.

5.2 QUALIDADE DO AR OBSERVADA

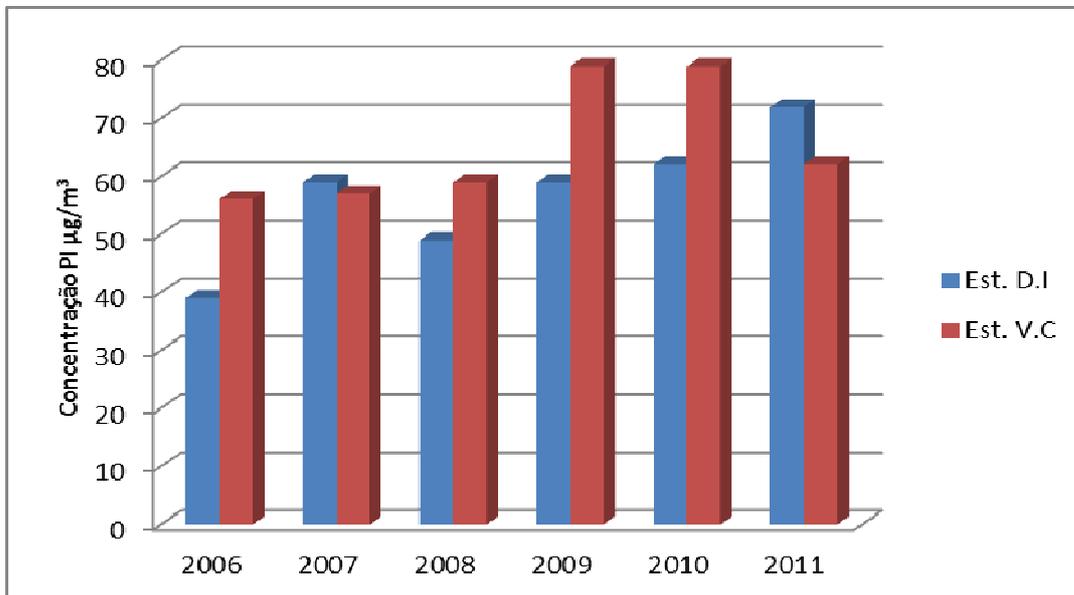
As concentrações médias anuais de partículas inaláveis (PI) e dióxido de enxofre (SO₂) observadas nas estações de monitoramento da qualidade do ar, existente em Vila do Conde (estação VC) e na área do distrito industrial (estação DI), no período de 2006 a 2011 estão na unidade $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (micrograma por metro cúbico

de ar) e foram comparadas aos limites anuais estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90 para os padrões de qualidade do ar primários e secundários definidos na mesma resolução.

5.2.1 Partículas Inaláveis - PI

A Figura 16 demonstra aumento das concentrações de partículas inaláveis nas áreas do distrito industrial de Barcarena e de Vila do Conde entre os anos de 2006 a 2011, em praticamente todo o período.

Figura 16 - Evolução da concentração de partículas inaláveis na atmosfera da área industrial de Barcarena e Vila do Conde no período 2006 a 2011.

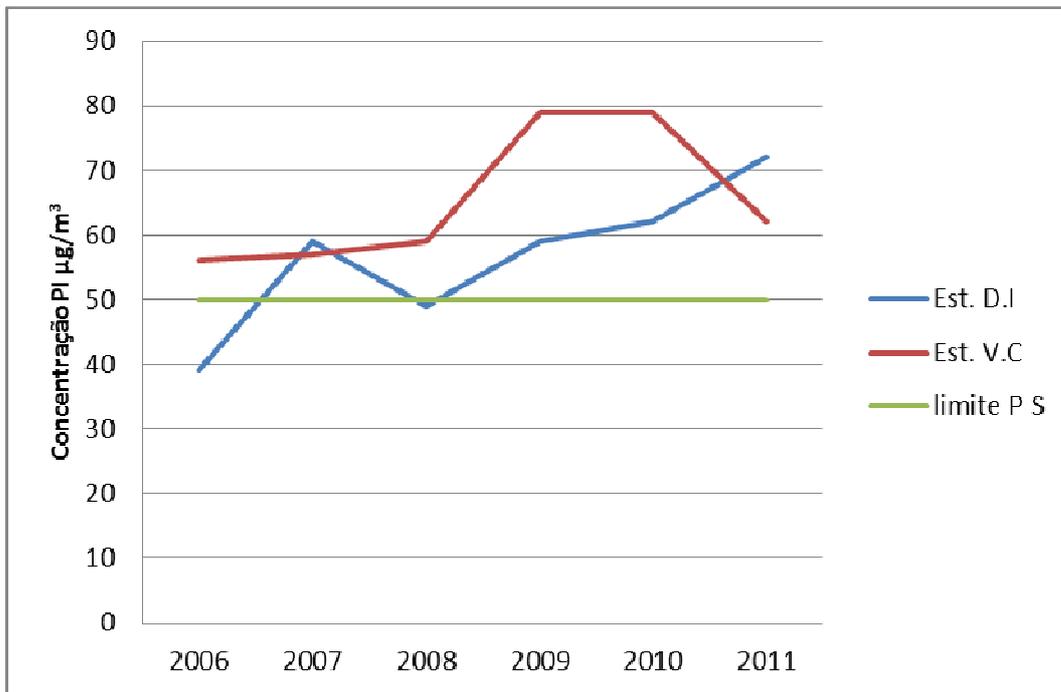


Fonte: SEMA (2011)

As concentrações médias de partículas para o período no distrito industrial de Barcarena e na Vila do Conde são de $56,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $65,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Tais concentrações estão acima do limite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estabelecido na Resolução CONAMA 03/90 para os padrões primário e secundário de qualidade do ar. A Figura 17 mostra que nos anos de 2009 e 2010, em Vila do Conde, ocorreram as maiores concentrações de partículas do período ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ultrapassando em 30,6% o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90.

Na área do distrito industrial, verificou-se que somente nos anos de 2006 e 2008 foi que as concentrações de partículas não superaram o limite legislado, talvez influenciado pela redução da produção industrial ou adoção de sistemas de controle de emissões gasosas mais eficazes.

Figura 17 - Evolução da concentração de partículas observada na área industrial de Barcarena e Vila do Conde comparada ao padrão primário e secundário (limite PS) de qualidade do ar no período de 2006 a 2011.



Fonte: SEMA (2011)

Ao avaliar as concentrações de partículas de Vila do Conde ($65,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e distrito Industrial de Barcarena ($56,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) observou-se níveis superiores ao relatado por Quiterio et al. (2005) para o distrito industrial de Magé ($55,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), na Baixada Fluminense (RJ), da cidade de São Paulo (SP) ($53 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e Caracas na Venezuela ($53 \mu\text{g}/\text{m}^3$), conforme Baldasano et al. (2003).

Podem ainda ser comparadas as concentrações de Santa Cruz ($87 \mu\text{g}/\text{m}^3$), um área industrial da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RJ) citada por Quiterio et al. (2004), a mencionada por Tresmondi (2008) para o município de Espírito Santo do Pinhal (SP), $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e as observadas por Allen et al (2009) na área de influência do polo industrial de Cubatão em São Paulo com concentrações de partículas variando entre ($58 - 157 \mu\text{g}/\text{m}^3$), tais resultados demonstram que as concentrações observadas em Barcarena são comparáveis (e em alguns casos superior) a valores observados em outras regiões industriais e áreas urbanas no Brasil e América Latina.

A concentração de partículas acima dos limites legais em Vila do Conde e possivelmente nas comunidades (Curupéré, Acuí, Dom Manuel e Vargem), deve

esta relacionada à posição geográfica das mesmas, assim como da orientação predominante do vento que se manifesta na região.

Considera-se que o aumento no volume de produção das indústrias no período deve ser considerado como potencial contribuinte para o acréscimo de poluentes lançados na atmosfera. Como exemplo de aumento de produção industrial em Barcarena foi a renovação da Licença de Instalação, pela SEMA no ano de 2007, da 6ª e 7ª linhas de produção da ALUNORTE que após conclusão dos serviços e obras de ampliação, passou de 4.505.000 para 6.375.00 toneladas por ano de alumina produzida, ou seja, um crescimento de 41,5% na produção industrial na região. (SEMA, 2007b).

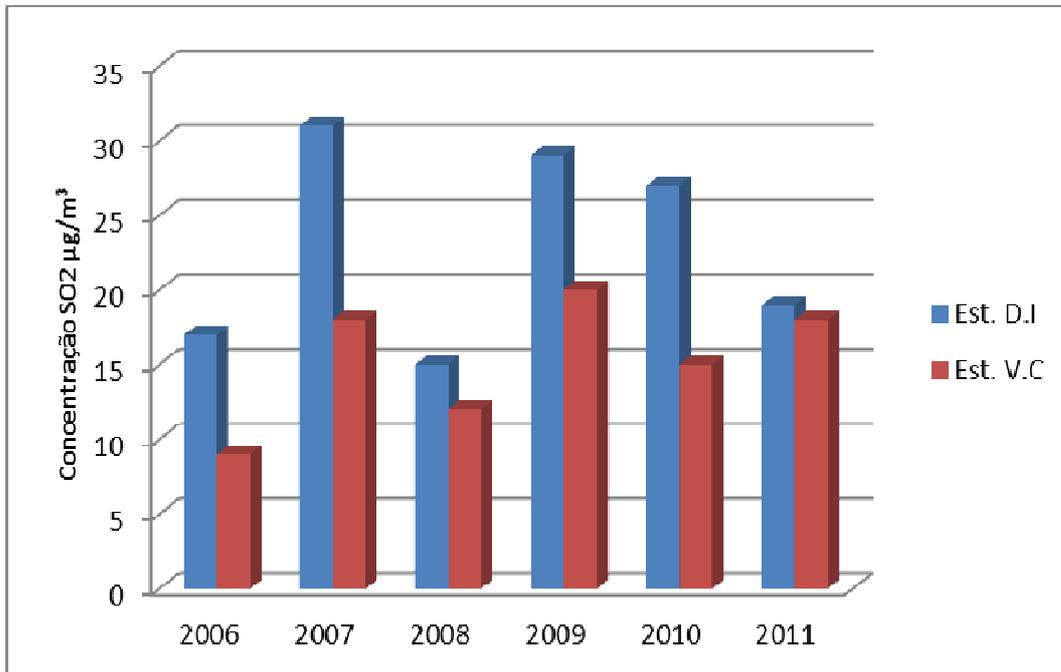
Observações na região estudada permitem afirmar que os gases e partículas das descargas de veículos que operam na área de influência do distrito industrial de Barcarena, assim como pilhas de materiais (exemplo coque e caulim) a céu aberto existentes nos empreendimentos são fontes com capacidade de influenciar a qualidade do ar em Vila do Conde e comunidades. Constatação similar foi alcançada por Allen et al (2009) dentro do parque industrial de Cubatão (SP) e adjacências, onde concluiu que a poluição do ar é influenciada pelo transporte rodoviário local e de partículas de resuspensão de poeiras.

Portanto, os níveis de concentrações de partículas observados na atmosfera de Vila do Conde e área do distrito industrial evidenciam a necessidade da elaboração do inventário das fontes de emissões industriais, avaliação das fontes móveis e fugitivas de partículas, do estabelecimento de metas de emissões, assim como do gerenciamento de qualidade do ar na área industrial de Barcarena e adjacências.

5.2.2 Dióxido de Enxofre

A Figura 18 expõe o aumento das concentrações de dióxido de enxofre nas áreas do distrito industrial de Barcarena e de Vila do Conde no período de janeiro de 2006 a dezembro de 2011, talvez provocada pela ampliação dos empreendimentos existentes e/ou instalação de novos no local.

Figura 18 - Evolução da concentração média anual de dióxido de enxofre observadas na área industrial de Barcarena e Vila do Conde no período de 2006 a 2011.

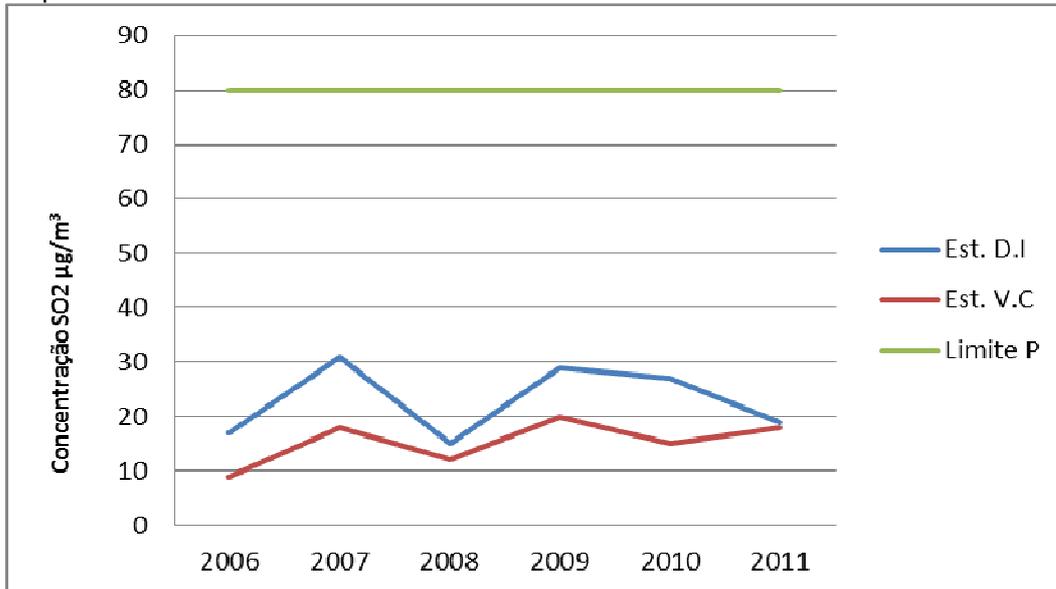


Fonte: SEMA (2011)

A concentração média anual de dióxido de enxofre monitoradas no distrito industrial de Barcarena ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e Vila do Conde ($15,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) está abaixo dos limites estabelecidos para o padrão primário ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e secundário ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA 03/90, figuras 19 e 20. Observa-se ainda que no ano de 2007, na área do distrito industrial, ocorreu a maior concentração de dióxido de enxofre do período ($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alcançando à época 38% do limite para o padrão primário de qualidade do ar vigente. Contudo, bem acima da média ($18,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) observada por Barbon e Gomes (2010) no município de Araucária, um importante polo industrial do estado do Paraná.

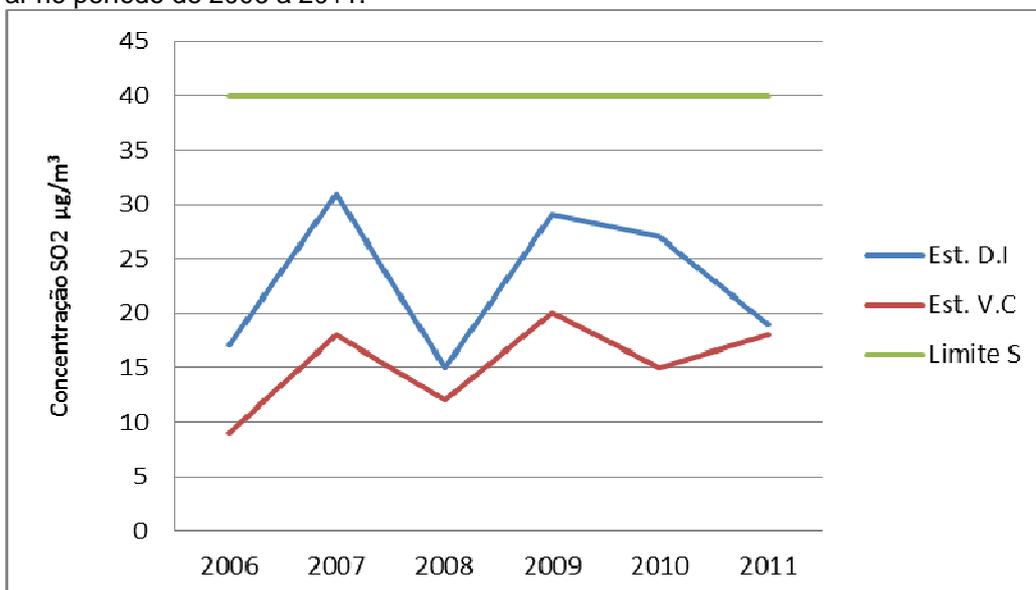
Entende-se que apesar do dióxido de enxofre (SO₂) não haver ultrapassado os limites legalmente instituídos, deve-se considerar a hipótese do mesmo provocar efeitos nocivos à saúde da população exposta. Tal afirmativa é corroborada por Bakonyi et al (2004) visto assegurar que a associação entre poluição e morbidade não exibe um nível de segurança para os poluentes, ou seja, não é caracterizado um nível seguro de poluição abaixo do qual não ocorra efeito.

Figura 19 - Evolução das concentrações de dióxido de enxofre na área industrial de Barcarena e Vila do Conde, comparadas ao padrão primário de qualidade do ar (limite P) no período de 2006 a 2011.



Fonte: SEMA (2011)

Figura 20 - Evolução temporal da concentração de dióxido de enxofre na área industrial de Barcarena e Vila do Conde comparada padrão secundário de qualidade (limite S) do ar no período de 2006 a 2011.



Fonte: SEMA (2011)

Avalia-se que as concentrações de poluentes atmosféricos ultrapassando ou não os limites estabelecidos para os padrões primários de qualidade do ar podem afetar a saúde da população exposta em Vila do Conde, comunidades e distrito industrial de Barcarena. Tal ocorrência foi confirmada na cidade de São Paulo por Martins et al (2002) que analisaram a relação existente entre pneumonia e poluição

atmosférica. O estudo considerou as partículas (PM_{10}) e o dióxido de enxofre onde foi observado que quando a média ultrapassou o padrão de qualidade do ar legislado, o número de atendimentos por pneumonia aumentou na região estudada.

Esquivel et al. (2011) destacam ainda que mesmo níveis baixos de poluição do ar, causam efeitos sobre a mortalidade e a morbidade humana. Isso reforça o entendimento de que a poluição atmosférica, ultrapassando ou não os padrões de qualidade estabelecidos, promove efeitos adversos na saúde das pessoas expostas.

O entendimento acima exposto é legitimado por estudos realizados no Brasil (CONCEIÇÃO et al., 2001; DAUMAS; MENDONÇA e LÉON, 2004; FREITAS et al., 2004) e em outros países (CLANCY et al., 2002; OSTRO et al., 2006) que obtiveram resultados positivos na relação entre concentrações de poluentes atmosféricos e a morbidade/mortalidade de pessoas.

Outro ponto a destacar foi a evolução das concentrações de partículas no distrito industrial e Vila do Conde que mostraram aparente relação de influência entre as mesmas, pois à medida que aumentou a concentração de partículas no distrito industrial, elevou o valor das mesmas em Vila do Conde, figura 16. Tal ocorrência pode estar relacionada à predominância dos ventos manifestada na região e a posição geográfica de Vila do Conde, localizada a sotavento do distrito industrial de Barcarena, desta forma sofrendo influência das emissões de partículas da área industrial.

Resultado diferente foi observado para as concentrações do dióxido de enxofre quando se examina os dados monitorados no distrito industrial e Vila do Conde (figura 18), destacando que os valores de SO_2 na área industrial são mais elevados. Tal ocorrência pode estar associada aos vários processos desenvolvidos pelas indústrias que utilizam combustível com enxofre em sua constituição, ausência ou ineficiência de sistemas de controle para este tipo de poluente nas fontes emissoras do distrito industrial, assim como intenso tráfego de veículos do ciclo Diesel na área industrial de Barcarena.

Um aspecto importante a se destacar são os resultados da evolução dos poluentes (partículas e SO_2) observados no distrito industrial e Vila do Conde que se mostram diferentes, assim sugerindo um estudo mais aprofundado sobre a confiabilidade dos dados observados, principalmente em razão dos pontos (somente dois) e período de monitoramento dos poluentes (uma vez por semana).

5.2.3 Índice de Qualidade do Ar

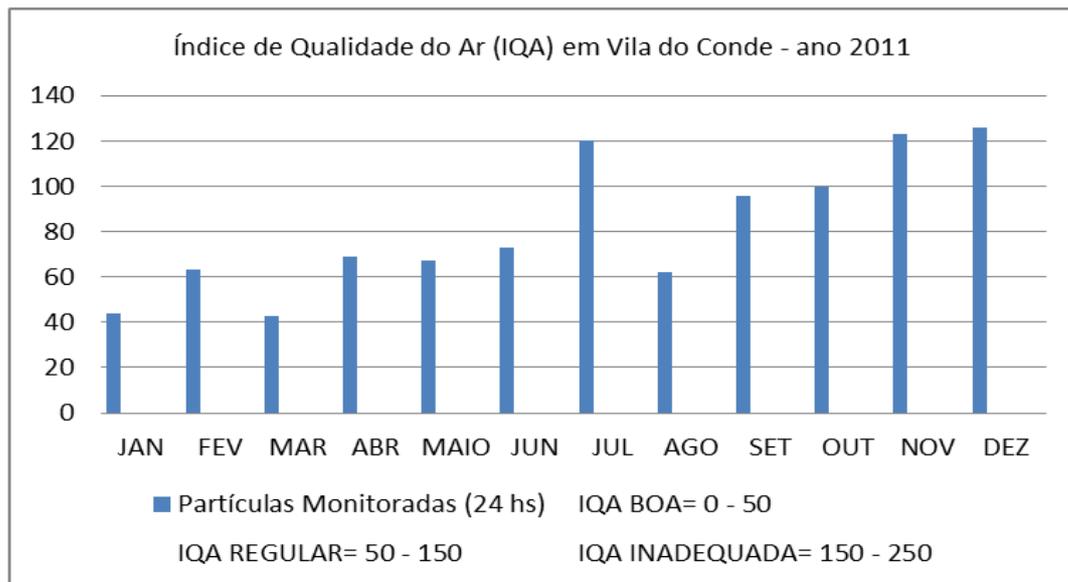
O Índice de Qualidade do Ar – IQA de Vila do Conde e distrito Industrial, para o ano de 2011 considerou as Partículas (PM_{10}) por ser o poluente que apresentou os piores casos de concentração. Para melhor entendimento dos resultados expostos, consultar subitem 3.6.3 Níveis e Índice de Qualidade do Ar e as figuras 21 e 22.

Na classificação do IQA foi utilizada a concentração mais elevada do poluente monitorado, durante os dias de medições, de cada mês do ano de 2011, considerando as médias de 24 horas do monitoramento. Portanto, a qualidade do ar nas estações reflete o pior caso de concentração para cada mês de 2011.

Em Vila do Conde, excetuando janeiro e março, no mínimo em um dia de cada mês do ano de 2011 o índice de qualidade do ar foi considerado regular. Esse quadro pode, além das emissões originadas na área industrial, esta sendo influenciado pelo transporte rodoviário dentro da vila e de partículas de resuspensão de poeiras de vias sem recobrimento asfáltico.

Na figura 21 verifica-se que no período de estiagem da região, o IQA se aproximou do inadequado, onde o regime de chuva menor pode ter contribuído para tal evolução.

Figura 21 - Concentrações de partículas monitoradas em Vila do Conde no ano de 2011, comparadas aos Índices de Qualidade de Ar (IQA).

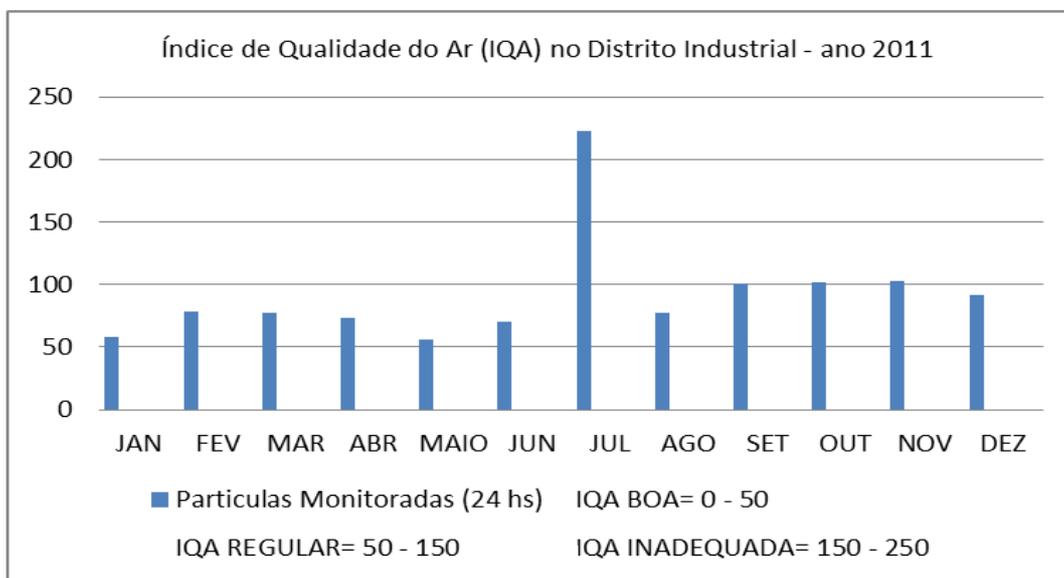


Fonte: SEMA (2011)

Na área do Distrito Industrial no mínimo em um dia, de cada mês do ano de 2011, o índice de qualidade do ar foi considerado regular. Na figura 22 observa-se

concentrações similares às registradas em Vila do Conde, exceto para os meses novembro e dezembro, onde na área industrial foi registrado menores valores. Destacando-se o mês de julho que apresentou a pior concentração ($223 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de todo ano em tela, sendo neste caso a qualidade do ar avaliada como inadequada. Atribui-se concentração tão elevada devido ao início do período de estiagem e ao tráfego veicular pesado próximo ao local de monitoramento que pode ter influenciado os resultados da concentração medida.

Figura 22 - Concentrações de partículas monitoradas no Distrito Industrial no ano de 2011, comparadas aos Índices de Qualidade de Ar (IQA).



Fonte: SEMA (2011)

Para o índice de qualidade do ar regular considera-se que a população em geral não é afetada, contudo grupos sensíveis (crianças e idosos) expostos ao poluente podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço, pois de acordo com Martins et al (2002), Freitas et al. (2004) e Sicard et al. (2011) as crianças e os idosos são os grupos etários que têm se mostrado mais susceptíveis aos efeitos da poluição atmosférica.

De forma semelhante Botelho et al. (2003), Cançado et al.(2006) e Mascarenhas et al. (2008) afirmam que embora as implicações não estejam bem definidas nas pessoas expostas, alguns efeitos agudos têm sido estudados em indivíduos previamente saudáveis e também em indivíduos portadores de doença respiratória, onde em geral as crianças e idosos são os grupos mais afetados.

Diante do exposto e com base nos resultados encontrados, pode-se inferir que os níveis de poluição do ar em Vila do Conde e áreas das comunidades, apesar de

não serem tão altos, apresentam potencial de promover efeitos adversos na saúde da população infantil e idosa expostas aos poluentes, nos aspectos de doenças respiratórias. Tal potencialidade pode ser melhor investigada através de pesquisas que associem poluição do ar a indicadores de saúde na área industrial de Barcarena e adjacências, assim possibilitando a realização de previsões para demanda de serviços de saúde, em caso de situações de deterioração da qualidade do ar.

Portanto, o estabelecimento do índice de qualidade do ar (IQA) na área industrial de Barcarena e adjacências pode ser uma ferramenta útil na definição de ações preventivas e de políticas públicas, visando o controle e monitoramento das emissões atmosféricas locais e de qualidade do ar.

5.3 RESULTADOS DA MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES

Os resultados da modelagem de dispersão de poluentes realizada para Material Particulado (PM_{10}) e Dióxido de Enxofre (SO_2). Os valores resultantes das simulações são exibidos em forma de concentrações médias. A concentração máxima diária consiste na concentração mais elevada ocorrida em um determinado dia, sendo esta data aquela que apresentou os maiores valores, dentre todos os dias considerados resultantes da modelagem.

A concentração máxima diária para o Material Particulado ocorreu em 20 de novembro de 2010 e Dióxido de Enxofre - SO_2 em 10 de janeiro de 2010, ambas às 24 horas, na altitude de 26 m, na área onde estão localizadas as fontes emissoras de poluentes utilizadas nas simulações, segundo a tabela 11.

5.3.1 Material Particulado - PM_{10}

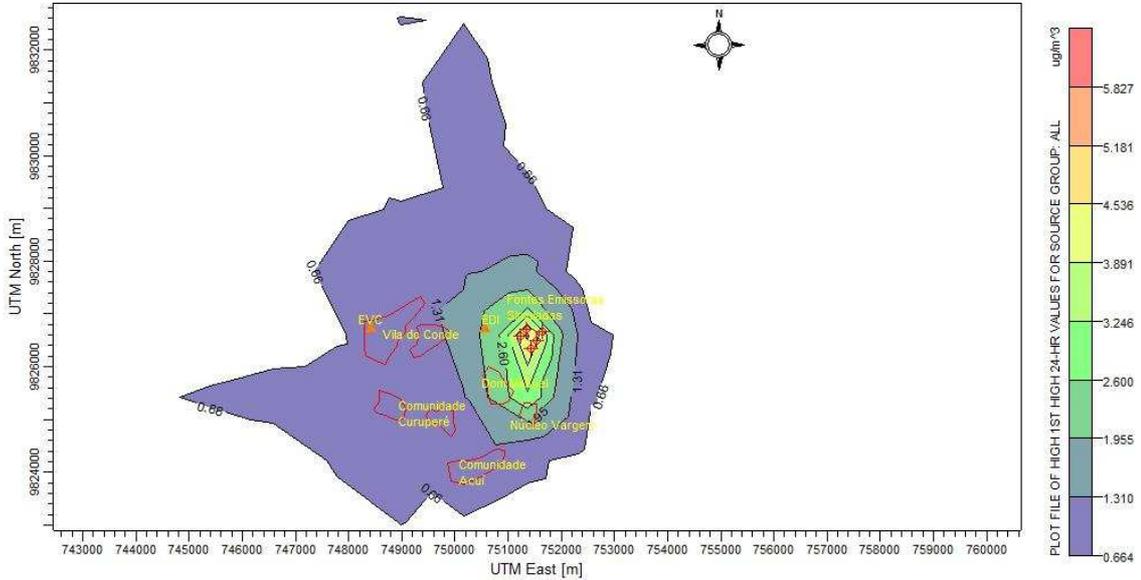
A pluma de poluentes resultante da simulação de 24 horas apresenta perímetro aproximado de 30 km e área de 33,04 km², se dispersando principalmente nas direções Sudoeste (SW), Noroeste (NW) e Oeste (W). A Figura 23 mostra as isolinhas de concentrações.

O deslocamento da pluma na orientação Sudoeste, em linha reta a partir das fontes emissoras, alcança distância máxima de 6.595m, com concentrações variando de 5,82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (próximo das fontes) a 0,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (nos pontos mais distantes) conforme a Figura 23.

As concentrações máximas simuladas apresentaram os seguintes valores: simulação diária (5,82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e simulação anual (1,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), localizando-se na área onde as fontes emissoras foram posicionadas. Os valores máximos simulados

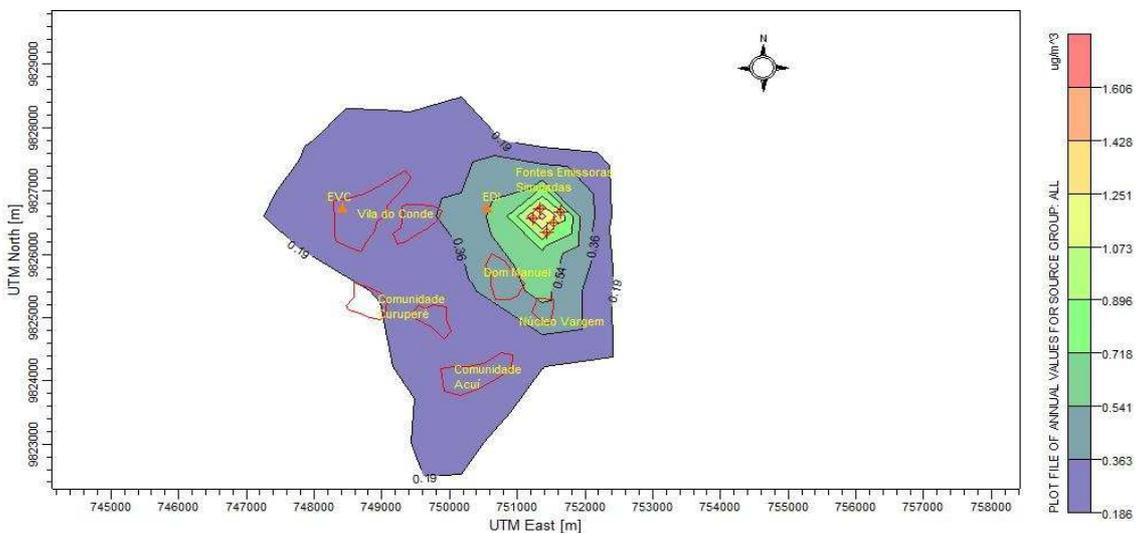
representam, respectivamente, 2,42% e 3,88% dos padrões de qualidade do ar diário ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e anual ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), estabelecidos na Resolução CONAMA 03/1990, conforme a Tabela 11.

Figura 23 – Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações para simulação de 24 horas.



O comportamento da pluma na simulação anual para MP, não diferente muito da pluma modelada para 24 horas, pois se concentra nas orientações Sudoeste, Oeste e Sul com alcance máximo de 4.080m na orientação sudoeste. A pluma apresenta perímetro de 18,3 km e área de $18,37 \text{ km}^2$. A Figura 24 mostra suas isolinhas de concentrações.

Figura 24 – Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma. Simulação anual.



As plumas simuladas para os períodos de 24 horas e anual recobrem totalmente as comunidades do Curupéré e Acuí, residencial Dom Manuel, núcleo da Vargem e distrito de Vila do Conde todos localizados na área de influência das fontes. Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações sobre áreas habitadas. Simulação de 24 horas.

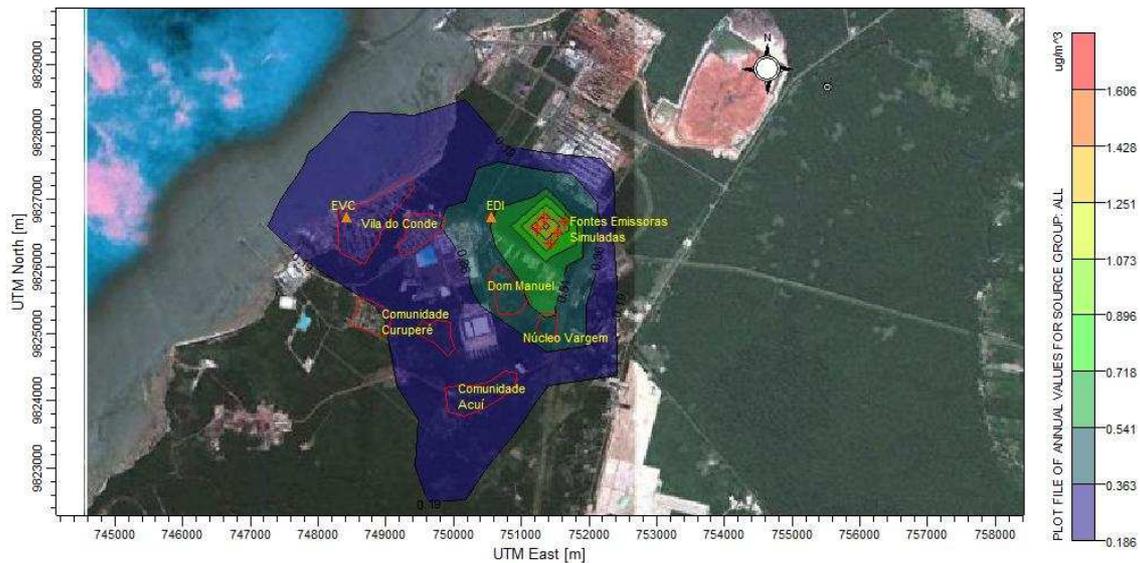
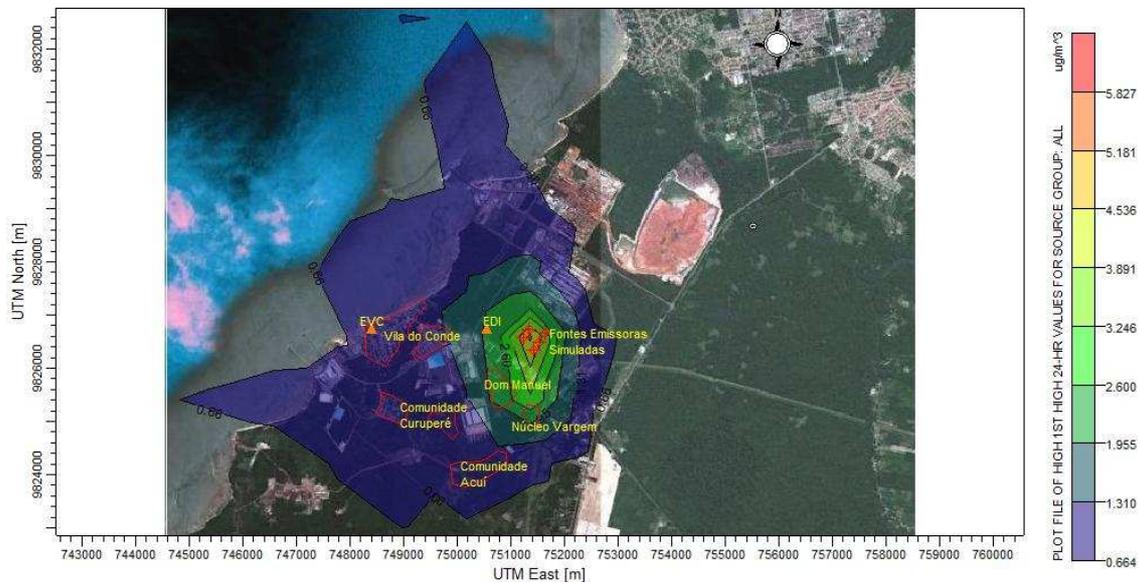


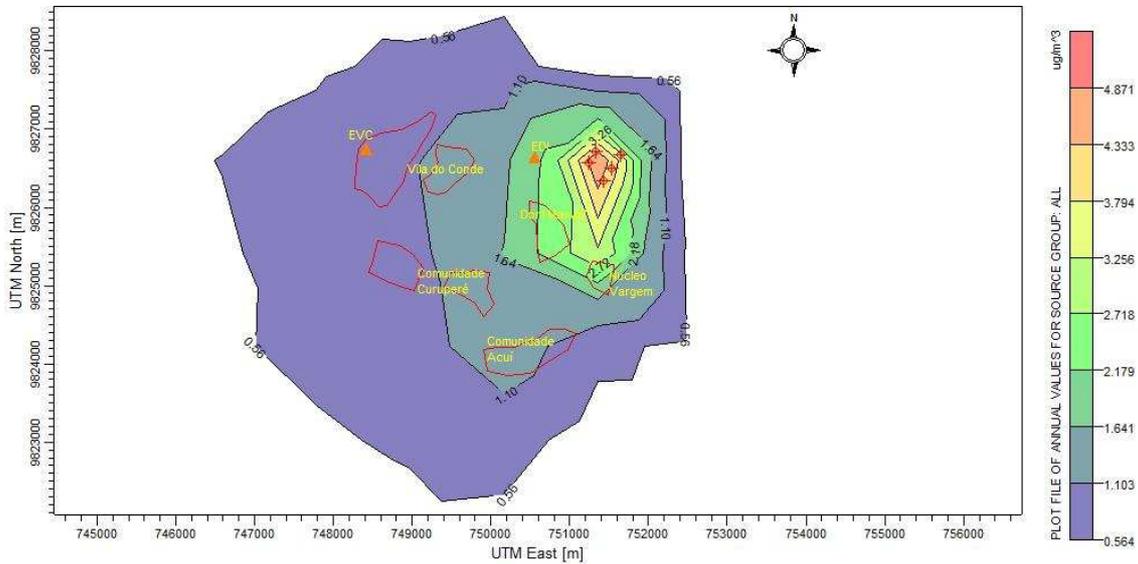
Figura 26 – Modelagem de MP com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações sobre áreas habitadas. Simulação anual.



As concentrações de material particulado simuladas estiveram abaixo dos valores observados, o que era esperado devido a não consideração de outras fontes fixas e veiculares existentes na área industrial de Barcarena, de emissões fugitivas provocadas pela ação do vento que ocorrem na área industrial.

de 4.775m na orientação Sudoeste. A pluma apresenta perímetro de 19,75 km e área de 25,95 km². A Figura 28 mostra as isolinhas de concentrações.

Figura 28 – Modelagem de SO₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma. Simulação anual.



As plumas de poluentes simuladas para os períodos de 24 horas e anual recobrem totalmente aglomerações humanas, denominadas como Vila do Conde e comunidades do Curupere e Acui, residencial Dom Manuel e núcleo da Vargem, desta forma sugerindo que tais áreas sofrem influência das fontes emissoras existentes na área industrial de Barcarena. Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Modelagem de SO₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma sobre áreas habitadas. Simulação de 24 horas.

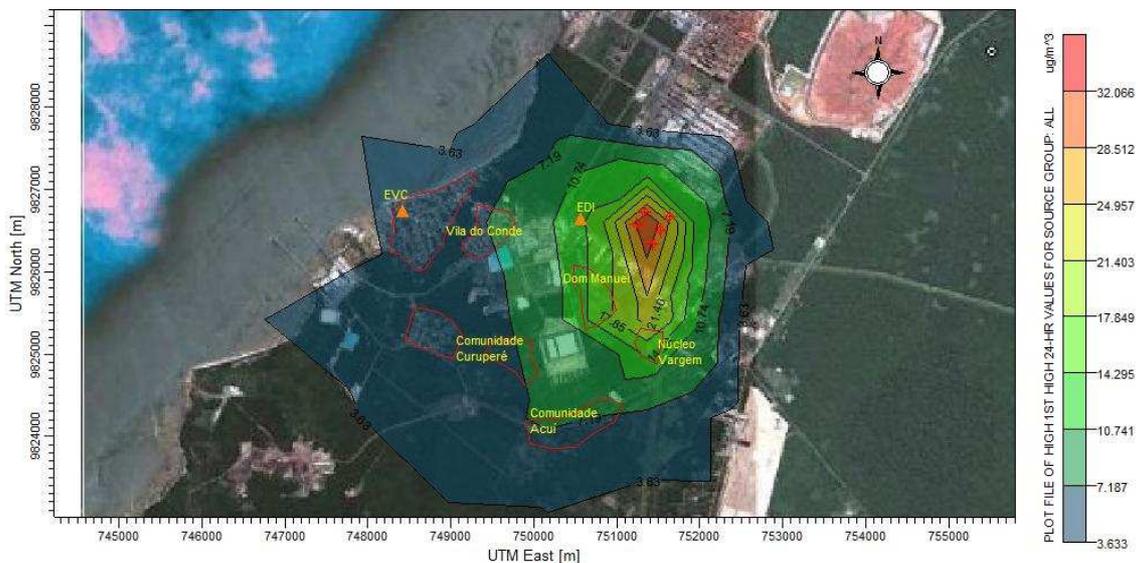
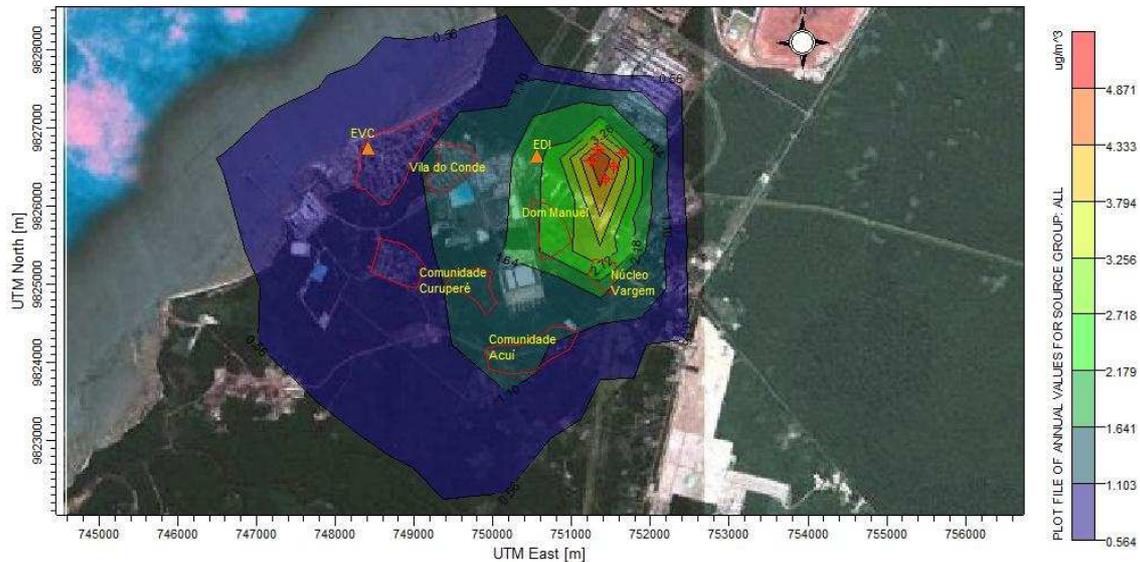


Figura 30 – Modelagem de SO₂ com o modelo AERMOD - isolinhas de concentrações da pluma sobre áreas habitadas. Simulação anual.



Os resultados das simulações apresentaram concentrações máximas de partículas e dióxido de enxofre com valores menores que o observado no monitoramento da qualidade do ar de Barcarena, assim como dos padrões de qualidade legislados. Resultado semelhante foi alcançado por Barbon e Gomes (2010) no polo industrial de Araucária (PR) com uso do modelo AERMOD. As concentrações abaixo dos limites legais eram esperadas, em função das fontes emissoras modeladas pertencerem somente a um empreendimento.

Com base nas figuras com isolinhas de concentrações construiu-se a tabela 11, que apresenta um resumo das concentrações e pontos onde ocorreram as máximas diária e anual para partículas e SO₂. Estes valores representam os resultados das maiores concentrações calculadas pelo modelo AERMOD View.

Tabela 11 - Comparação entre as concentrações de PTS e SO₂ simuladas e os padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA 03/1990.

Parâmetros	Partículas Totais em Suspensão - PTS		Dióxido de Enxofre – SO ₂	
	Diário (µg/m ³)	Anual (µg/m ³)	Diário (µg/m ³)	Anual (µg/m ³)
Concentrações Simuladas µg/m ³	5,82	1,60	32,06	4,87
Padrão Primário µg/m ³	240	80	365	80
Padrão Secundário µg/m ³	150	60	100	40
Coordenadas UTM do ponto identificado como de maior concentração	751.360 E / 9.826.607 N	751.360 E / 9.826.607 N	751.360 E / 9.826.607 N	751.360 E / 9.826.607 N

Observando as isolinhas de concentrações é possível visualizar os locais receptores de poluentes atmosféricos, caso entre em operação no distrito industrial de Barcarena empreendimento com as mesmas características de emissões atmosféricas constantes na Tabela 9.

Na análise das isolinhas de concentração de poluentes verificam-se pontos receptores não são cobertos por estações de monitoramento do ar, a fim de se detectar violações aos padrões de normatizados. Isto indica que os pontos de observações existentes poderiam ser em maior número e/ou situados em locais diferentes da posição atual.

Para Moreira e Tirabassi (2004) o número de pontos de medida de uma rede de qualidade do ar é limitado por motivos de ordem econômica e administrativa que somado a avaliações de localização inadequadas, resulta em disposição espacial poucos representativas. Por este motivo, os modelos matemáticos que simulam o transporte e a difusão dos poluentes na atmosfera constituem uma ferramenta para auxiliar nas medidas de concentrações e prognosticar a evolução das mesmas.

O modelo AERMOD previu de forma coerente a dispersão de poluentes, assim como as áreas potencialmente impactadas pela poluição atmosférica das indústrias, mostrando ser ferramenta útil para auxílio da gestão da qualidade do ar na área industrial de Barcarena.

5.4 QUADRO SOCIAL DAS ÁREAS AFETADAS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As figuras 25, 26, 29 e 30 apresentam a identificação das áreas afetadas pela poluição atmosférica, através da sobposição das isolinhas de concentração de poluentes na imagem aérea da região alvo da pesquisa. Nestas figuras, pode-se observar que Vila do Conde e as áreas das comunidades do Curupeté, Acuí, residencial Dom Manuel e núcleo da Vargem são os locais afetados pela dispersão de poluentes atmosféricos simulados.

Vila do Conde possui quadro institucional com centro comunitário, associações de trabalhadores e órgãos públicos. Apresenta heterogeneidade de atividades econômicas como pesca, comércio, serviços, lazer e indústrias, oferecendo melhor oferta de serviços públicos entre outros, redes de abastecimento de água, rede de distribuição de energia elétrica e serviço de atendimento a saúde e conseqüentemente maior população, estimada por Rodrigues (2008), para o ano de 2007, em 12.700 habitantes distribuídos em 5.100 famílias. A tabela 12 apresenta a

classificação e faixa etária da população de Vila do Conde onde crianças de 0 a 10 anos ou idosos acima dos 60 anos representam 30% (3.810 pessoas) dos habitantes de Vila do Conde.

Tabela 12 - População de Vila do Conde segundo faixa etária.

Classificação/Faixa Etária	População de Vila do Conde (hab.)	Percentual da População (%)
Jovens e Adultos (11 a 60 anos)	8890	70
Crianças (0 a 10 anos) ou Idosos (acima de 60 anos)	3810	30
TOTAL	12700	100

Fonte: RODRIGUES (2008)

No tocante a equipamentos de saúde apropriados, existe um Centro de Saúde – CS e uma Unidade de Saúde Familiar – USF (Figuras 31 e 32) que funcionam regularmente para atendimento à população de segunda a quinta. Contudo, o serviço prestado pelos dois estabelecimentos de saúde, limita-se a consultas (somente na especialidade Clínica Geral), distribuição de medicamentos, execução de curativos e aplicação de aerossol, dentre outros de menor complexidade.

Conforme relatos da diretora do Centro de Saúde, os principais atendimentos buscados no CS e USF estão ligados principalmente a coceiras, irritação de pele e outros provenientes do contato com a água poluída da região, sendo a procura por atendimentos relacionados a problemas respiratórios muito baixa e quando existentes, após consulta médica, os casos com gravidade são encaminhados para tratamento em Belém, capital do estado do Pará. O CS e a USF de Vila do Conde também atendem moradores das comunidades do Curuperé, Acuí, entre outras.

Figura 31 – Centro de Saúde.



Figura 32 – Unidade de Saúde Familiar



O local onde estão às comunidades do Curuperé, Acuí, residencial Dom Manuel e o núcleo da Vargem se destaca em função de sua proximidade a área industrial de Barcarena, pois se situam na direção predominante (Nordeste - Este) do regime de vento manifestado na região, a sotavento das principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos e de ser uma das áreas mais próxima com núcleos de ocupação humana.

No ano de 2007 foi estimado por CVRD/DELPHI (2007) e SEMA (2007a) que as citadas comunidades possuísem população aproximada de 380 pessoas, distribuídas em 183 famílias. Destaca-se ainda que à época apenas 29 famílias fossem residentes permanentes, totalizando 100 pessoas. Isto se deve ao fato que muitas famílias trabalham na área durante o dia, ou nos momentos de plantio e colheita e a noite retornam para suas residências em Vila do Conde.

No ano de 2007 a distribuição dos habitantes das comunidades, de acordo com a faixa etária, revelava uma concentração de crianças e adolescentes (de 0 a 14 anos), e outra concentração entre jovens adultos e adultos (de 22 a 49 anos), representando 54% da população que reside permanentemente nas áreas. Verificaram-se poucos indivíduos na faixa etária acima de 50 anos, conforme demonstra a Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 - População das comunidades segundo faixa etária.

Comunidades Faixa Etária	Acuí	Curuperé	Dom Manuel	Vargem	Total
de 0 a 6 anos	7	8	4	1	20
de 7 a 14 anos	-	17	3	1	21
de 15 a 17 anos	3	2	-	-	5
de 18 a 21 anos	2	-	3	-	5
de 22 a 29 anos	3	7	3	-	13
de 30 a 49 anos	6	11	6	-	23
de 50 a 65 anos	1	6	1	2	10
Acima de 65 anos	-	1	1	1	3
TOTAL	22	52	20	5	100

Fonte: Adaptado de CVRD/DELPHI (2007).

Observações feitas na área de estudo em 25 de agosto e 23 de novembro de 2011 e 16 de janeiro de 2012 permitem afirmar que, excetuando parte de Vila do Conde, a maioria dos imóveis é desprovida de serviços de coleta de resíduos

domésticos, tratamento de água e esgoto. A distribuição de energia elétrica se estende de modo não abrangente a todas as residências e a rede pública de abastecimento de água é inexistente.

No que se refere à tipologia construtiva e a existência ou não de infraestrutura (saneamento básico, fornecimento de energia, serviço de saúde, organização comunitária, etc.), percebe-se que às formas de ocupação existentes nas comunidades Acuí, Curuperé, residencial Dom Manuel e o núcleo da Vargem, reflete-se numa organização espacial com grande disparidade entre relação à Vila do Conde.

Quanto à organização social, percebe-se que no local a população se manifesta de forma tímida sobre questões ambientais, exceto em face de um evento específico, como a morte de peixes, têm sido a origem de mobilização de setores da população local.

Considerando somente os aspectos de poluição atmosférica e condições materiais de vida das populações foi identificado como área fortemente afetada o quadrante sudoeste da área de estudo, onde se encontram Vila do Conde e as comunidades, o qual, aliado à sua posição geográfica desfavorável do ponto de vista das fontes fixas emissoras, torna-a potencialmente comprometida no que diz respeito à situação de saúde das suas populações. Nesta área viviam em 2008, cerca de 12.800 pessoas o que representava, à época, 13,52% da população total de Barcarena.

É importante ressaltar que Vila do Conde e comunidades possuem percentuais de idosos e crianças, que somados representam 30% do total das suas populações. Este fato é relevante, pois segundo Botelho et al. (2003), Esquivel et al. (2011) e Ignotti et al. (2007) estes grupos etários são os mais vulneráveis do ponto de vista da saúde aos efeitos da poluição do ar. Corroborando a afirmativa, os resultados apontados por Carmo et al. (2010) em estudo que avaliou os efeitos da exposição ao material particulado, onde sugerem que os mesmos estão associados a efeitos adversos à saúde respiratória de crianças.

Considera-se que a população residente nas proximidades do distrito encontra-se bastante vulnerável a exposição aos poluentes atmosféricos, por apresentarem problemas sociais contínuos e crescentes. A situação é inquietante, visto pouco se saber das ações adotadas por órgãos competentes responsáveis pela mudança

desse quadro que tende a piorar pela intensificação das atividades desenvolvidas pelas indústrias e pelo seu crescimento populacional.

É certo que a implantação do distrito acarretou mudanças de ordem social e econômica para o município de Barcarena, porém tais transformações não foram acompanhadas pelo poder público no que tange a qualidade ambiental e de vida da população residente em suas adjacências. A cidade, como um todo, cresceu sem um planejamento adequado, sendo as aglomerações humanas instaladas na periferia do distrito Industrial o melhor exemplo disso.

A ausência de medidas planejadoras dos órgãos públicos pode ser facilmente observada quanto à localização do distrito Industrial em relação à direção predominante do vento, potencializando a degradação da qualidade do ar nas áreas de Vila do Conde e das comunidades humanas próximas. Para Porto e Milanez (2009) apesar da importância dos impactos à saúde humana provocados pelas emissões atmosféricas industriais, os órgãos ambientais não estão preparados para analisar aspectos relacionados ao meio ambiente e a saúde pública, visando o estabelecimento de um processo integrado de controle dos citados aspectos.

A população afetada pelos poluentes atmosféricos vive em estado de insegurança, devido à ausência de estratégias, ações, programas, e projetos objetivando controlar a contaminação do ar, água e solo, na área de influência do distrito industrial de Barcarena, assim como vivenciar rotineiramente problemas relacionados a depreciação dos ambientes naturais e da própria condição de vida que levam nas áreas que habitam.

Apesar dos esforços dos órgãos ambientais responsáveis pelo licenciamento das indústrias que operam em Barcarena para garantir a sustentabilidade ambiental de suas atividades, observou-se que a discussão sobre a desigualdade entre grupos sociais nas áreas de influência do distrito industrial precisa ser aprofundada metodologicamente e discutida politicamente para que seja incorporada a programas sociais efetivos que minimizem os efeitos negativos, decorrentes das pressões exercidas pelas atividades industriais sobre o meio ambiente.

6. CONCLUSÃO

A análise das variáveis meteorológicas permite concluir que Barcarena esta situada em região do estado do Pará considerada quente, pois apresenta média de altas temperaturas. A direção predominante do vento foi de nordeste - este (NE - E),

sentido de Vila do Conde e comunidades do Curuperé e Acuí, residencial Dom Manuel, núcleo da Vargem, sendo mais frequentes no período de estiagem. A velocidade média do vento em Barcarena é superior às observadas em outras regiões do Pará e outros estados da Amazônia, sendo maiores nos meses menos chuvosos. O comportamento dos ventos observados contribui para uma boa dispersão de poluentes atmosféricos, contudo sugerem que as emissões do distrito industrial de Barcarena são direcionadas frequentemente para Vila do Conde e a áreas das comunidades.

A precipitação anual de Barcarena apresenta média elevada, exibindo maior pluviosidade nos meses janeiro a maio, e menor no intervalo de agosto a dezembro. Considera-se que a média pluviométrica tem a capacidade de remover poluentes dispersos na atmosfera local, pois foi observada aparente sazonalidade nas concentrações de partículas, com tendência a menores valores, no período chuvoso, e o oposto, na temporada de estiagem da região.

A análise da qualidade do ar em Vila do Conde e área do distrito Industrial de Barcarena mostrou que o material particulado foi o poluente cujas concentrações anuais apresentaram valores acima dos limites legislados. Condição que não foi observada para o dióxido de enxofre. Os níveis de concentrações de partículas são comparáveis (e em alguns casos superior) a valores registrados em outras regiões industriais e áreas urbanas no Brasil e América Latina.

A evolução anual das concentrações de partículas no distrito industrial e Vila do Conde mostraram relação de influência entre as mesmas, pois à medida que aumentou a concentração de partículas no distrito industrial, o valor das mesmas em Vila do Conde se elevou. Tal ocorrência esta relacionada à predominância dos ventos manifestada na região, bem como a posição geográfica de Vila do Conde, localizada a sotavento da área industrial. Concentrações de partículas nas áreas comunidades, não foram registradas por inexistência de monitoramento. Contudo, cogita-se a possibilidade de ocorrências nestes locais, em função de se localizarem no quadrante predominante do vento manifestado na região.

Na classificação do índice de qualidade do ar – IQA, de Vila do Conde e do distrito industrial, no mínimo em um dia de cada mês do ano de 2011 a qualidade do ar foi considerado regular. Tal quadro pode potenciaizar problemas de saúde, de origem respiratória, em grupos sensíveis como crianças, idosos que no ano de 2007, representavam 30% dos habitantes de Vila do Conde.

As simulações com o modelo AERMOD View comprovaram que as emissões atmosféricas de um empreendimento localizado na área industrial de Barcarena, se direcionam predominantemente para Vila do Conde e áreas das comunidades do Curupeté, Acuí, residencial Dom Manuel e núcleo da Vargem.

As modelagens demonstraram a possibilidade de utilizar o modelo AERMOD View na verificação da distribuição espacial dos receptores, do alcance e distribuição das plumas de poluentes, na estimativa das concentrações de poluentes emitidos e comparações entre concentrações de poluentes simulados e qualidade do ar observada.

Pelas características sociais identificadas em Vila do Conde e áreas das comunidades Acuí, Curupeté, residencial Dom Manuel e o núcleo da Vargem, tais áreas se consolidam como representantes da ausência de planejamento na orientação do desenvolvimento industrial de Barcarena, do desordenado uso do solo local e da degradação da qualidade de vida de suas populações. Os habitantes destas áreas vivem em situação inquietante, visto pouco saberem das ações adotadas por órgãos competentes responsáveis pela mudança desse quadro que tende a piorar pela intensificação das atividades desenvolvidas pelas indústrias e pelo seu crescimento populacional.

Por fim, entende-se que a população atingida pelos poluentes atmosféricos, sobretudo originados na área industrial, vive em estado de insegurança, devido à ausência de estratégias, ações, programas, e projetos objetivando de forma efetiva controlar a contaminação do ar, água e solo, na área do distrito industrial de Barcarena e adjacências, assim como vivenciar rotineiramente vários problemas no que consiste a depreciação dos ambientes naturais e da própria condição de vida que levam nos locais que habitam.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, A.G. et al. Influence of sources and meteorology on surface concentrations of gases and aerosols in a coastal industrial complex. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. Vol.20. p.214-221. 2009.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. Tradução: Marcos Tadeu Grassi et al. Editora Bookman, 4 ed. Porto Alegre. 2011.
- BALDASANO, J.M. et al. Air quality data from large cities. **The Science of the Total Environment**. v. 307. n.1. p. 141–165. 2003.
- BARBON, A; GOMES, J. Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com uso do modelo AERMOD. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.15 n.2. p. 129-140. 2010.
- BEZERRA, A.C.N. CAVALCANTI, E.P. Energia estática sobre o norte e nordeste do Brasil relacionada com a temperatura da superfície do mar. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.23. n.2. p.239-263. 2008.
- BOTELHO, C. et al. Fatores ambientais e hospitalizações em crianças menores de cinco anos com infecção respiratória aguda. **Cadernos de Saúde Pública**. v.19. n.6. p.1771–1780. 2003.
- BAKONYI, S.M.C. et al. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. **Revista Saúde Pública**. v.38. n 5 . p 695. 2004.
- BRASIL Lei Federal n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de aplicação e dá outras providências**. Brasília, DF, 1981.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 18. **Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE**. Brasília, DF, 06 de maio de 1986.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, Senado, 1988.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 05. **Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Controle da qualidade do Ar – PRONAR**. Brasília, DF, 15 de junho de 1989.
- _____. Resolução nº 03. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR**. Brasília, DF, 28 de junho de 1990a.
- _____. Resolução nº 08. **Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição**. Brasília, DF, 06 de dezembro de 1990b.

_____. Resolução nº 382. **Dispõe sobre os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas**, Brasília, DF, 26 de dezembro de 2006.

_____. Resolução nº 418. **Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso**. Brasília, DF, 25 de novembro de 2009.

CANÇADO, J.E. et al. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. **Environmental Health Perspectives**. v.114. n.5. p.725-729. 2006.

CARMO, CN. et al. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista panamericana de salud pública**. v.27. n.1. p.10-6. 2010.

CARVALHO JR, J.A. ; LACAVAL, P.T., **Emissões em Processos de Combustão**. Editora UNESP, São Paulo, 2003.

CAVALCANTI, P.M.S. **Avaliação dos impactos causados na qualidade do ar pela geração termelétrica**. 2003. 100f . Dissertação (mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

CERQUEIRA, L. Poluentes Atmosféricos, Fórum Livre. Disponível em: <<http://www.unilivre.org.br/centro/textos/polar.htm>. 2010>. Acesso em: 15 de dezembro de 2011.

CLANCY, L. et al. Effect of air-pollution control in deaths rates in Dublin, Ireland: an intervention study. **The Lancet**. v. 360, n. 9341, p. 1210-1214, 2002.

COMPANHIA TECNOLÓGICA DE SANAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do estado de São Paulo**; São Paulo; 1 CD : il. Color; CETESB, 2011a.

_____. **Plano de controle de poluição veicular do Estado de São Paulo – 2011 – 2013**, São Paulo, CETESB, 2011b.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE (CVRD). Delphi projetos e gestão (DELPHI). **Estudo de impacto ambiental da UTE Barcarena**. Belo Horizonte. Abril de 2007.

CONCEIÇÃO, G.M.S. et al.. Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 4, n. 3, p. 206-219, 2001.

CORTEZ, L.A.B.; LORA,E.E.S.; OLIVARES GÓMEZ, E. **Biomassa para energia**. Campinas. SP. Editora Unicamp. 2009.

COSTA, A.C.L. Estudos Hidrometeorológicos em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia – Projeto ESECAFLOR. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21. n.3b. p. 283 – 290. 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 236p.1999.

CIMORELLI, A. J.; PERRY, S. G.; VENKATRAN, A.; WEIL, J. C.; PAINE, R. J.; WILSON, R. B.; LEE, R. F.; PETERS, W. D.; BRODE, R. W. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. **Journal of Applied Meteorology**. v. 44. p. 682 – 693. 2004a.

CIMORELLI, A.J. et al. **AERMOD description of model formulation. EPA-454/R-03-004**. 2004b.

CUNHA, R.M.P. **Transportes de poluentes na região do pólo petroquímico de triunfo**. 2002. 155f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, 2002.

DAUMAS, R.P.; MENDONÇA, G.A.S.; LEÓN, A.P. Poluição do ar e mortalidade em idosos no município do Rio de Janeiro: análise de série temporal. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 20, n.1, pp. 311-319, 2004.

DERISIO, J.C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 2 ed. – São Paulo: Signus Editora. 2000.

DUARTE, A.F. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971 – 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.21. n.3b. p.308-317. 2006.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **AERMOD description of model formulation. EPA-454/R-03-004**. 2004a. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2012.

_____. **Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET). EPA-454/B-03-002**. 2004b. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2012.

_____. **Users guide for the AMS/EPA Regulatory Model - AERMOD. EPA-454/B- 03-001**. 2004c. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2012.

_____. **Users guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP). EPA- 454/B-03-003**. 2004d. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2012.

ESQUIVEL, G.A.R. et al. Avaliação da correlação entre as concentrações de poluentes atmosféricos e a mortalidade de idosos no município de Curitiba. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.16. n.4. p.387-394. 2011.

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño: nebulosidade convectiva nas regiões equatoriais e tropicais da América do Sul e oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.21. n.1. p. 1-14. 2006.

FREITAS, C. et al. Internações e óbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. **Revista Saúde Pública**. v.38. n.6. p.751–757. 2004.

FREITAS, M. K. **Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano**: determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO. 2003. 242f. Tese (doutorado) - USP/São Carlos-SP, 2003.

FRUEHAUF, G.L.C. **A Deterioração da qualidade do ar e do clima na região metropolitana de São Paulo**. 1998. 210f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Física, 1998.

GOOGLE EARTH. **Imagem da área industrial de Barcarena – Pa**. Disponível em: <www.earth.google.com>. Acesso em: 15 de setembro de 2011.

HANNA, S.R. et al. Evaluation of the ADMS, AERMOD and ISC3 dispersion models with de Optex, Duke, Forest, Kinkaid, Indianapolis and Lovett Field data sets. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 16, n. 1-6, p. 301-314. 2001.

IGNOTTI E, et al. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. **Revista Brasileira Epidemiológica**. V.10. n.4. p.453–64. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Pesquisa de Informações básicas municipais**; perfil dos municípios brasileiros. Meio Ambiente – 2002. Rio de Janeiro. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). **Resultados divulgados no Diário Oficial da União em 04.11.2010**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/PA2010.pdf>. Acesso em 09/10/2011.

LORA, E.E.S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MARENGO, J. et al. On the onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**. v.14. p. 833-852. 2001.

MARTINS, L.C, et al. Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. **Revista Saúde Pública**. v.36. n.1. p.88-94. 2002.

MASCARENHAS, M.D.M. et al. Poluição atmosférica devida a queima de biomassa florestal e atendimentos de emergência por doença respiratória em Rio Branco,

Brasil - setembro 2005. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**. v.34. n.1. p.42–46. 2008.

MELO, G.C. B.; MITKIEWICZ, G.F. M. **Dispersão Atmosférica de poluentes em um complexo industrial siderúrgico**. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., Cancun, Mexico. **Proceeding**. Cancun, Mexico. p.08. 2002.

MENEZES, C.R.C, MONTEIRO, M.A. ; GALVÃO, I.M.F. **Zoneamento ecológico-econômico das zonas Leste e Calha Norte do Estado do Pará**. Belém, PA: Núcleo de Gerenciamento do Programa Pará Rural, 2010. 2v.

MONTEIRO, M.A. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. **Revista Estudos Avançados**, v.19, n. 53, p.187-208. 2005.

MORAES, B.C. et al. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**. v. 35. n.2. p. 207-214. 2005.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente & Sociedade**. vol. VII. nº. 2. jul./dez. 2004.

MUNHOZ, F. C.; GARCIA, A. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava–SP. **Revista brasileira de meteorologia**.v. 23. n. 1. p. 30-34. 2008.

OLIVEIRA, F. E. M. de. **Estatística e probabilidade**: exercícios resolvidos e propostos. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

OSTRO, B. et al. Fine particulate air pollution and mortality in nine California counties: results from CALFINE. **Environmental Health Perspectives**, v. 114, n. 1, p. 29-33, 2006.

PORTO, M.F. MILANEZ, B. Eixos de desenvolvimento econômico e geração de conflitos socioambientais no Brasil: desafios para a sustentabilidade e a justiça social. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**. v.14, n.6. p.1983-1994. 2009.

PAGLIUSO, J. D. et al. **Desarrollo de un modelo de red neural artificial para la predicción de la concentración de CO en áreas urbanas**. In: CONGRESO DE INGENIERÍA DEL TRANSPORTE, 5., 2002, Santander – Catabria, España. **Proceeding**. Santander – Catabria, España, 2002. p.370-380.

PARÁ. **Lei Ambiental do Estado do Pará nº 5.887, de 09 de maio de 1995**. Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Belém, 2005.

PARÁ. Secretaria de Estado de Planejamento, Orçamento e Finanças. Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará. **Estatística municipal de Barcarena**. Belém, PA, 2011.

PHILIPPI JR. et al. **Municípios e Meio Ambiente: Perspectivas para a Municipalização da Gestão Ambiental no Brasil**. São Paulo: Associação Nacional de Municípios e Meio Ambiente, 1999. 201 p.

PIRES, D.O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2005. 188 f. Dissertação (mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ., 2005.

QUITERIO, S.L. et al. Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period. **Atmospheric Environment** . v.38, p.321–331. 2004.

QUITERIO, S.L. et al. Evaluation of levels, sources and distribution of airborne trace metals in seven districts of the Baixada Fluminense, Rio de Janeiro, Brazil. **Atmospheric Environment** . v.35, p.3503–3512. 2005.

RAMOS, V.P.; FALAGUASTA. M.C.R. **Relatório técnico** - estudo de dispersão atmosférica das emissões dos poluentes da Alcoa, Unidade de Juruti, PA. Alcoa World Alumina Brasil LTDA, São Paulo, 2010.

RENDEIRO, G. et al. **Combustão e gasificação de biomassa sólida** - soluções energéticas para a Amazônia. Ministério de Minas e Energia, Brasília. 192p, 2008.

RIBEIRO, L. E. **Aspectos estruturais da forma urbana**: suas influências na concentração de poluentes atmosféricos e nos impactos receptivos – alternativas de planejamento urbano para o caso de São Paulo- SP. 1993. 413f. Tese (doutorado) - Escola Politécnica-USP. 1993.

RIBEIRO, S.K.; COSTA, C.V.; DAVID, E.G.; REAL, M.V.; DÁGOSTO, M.A. **Transporte e mudanças climáticas**. 1ª ed. Rio de Janeiro, Mauad Ed.Ltda., 2000.

RODRIGUES, J.E.C. **Risco tecnológico: uma análise do porto de Vila do Conde como área potencial de ameaça ao vazamento de óleo para comunidades em situação de vulnerabilidade**. 2008, 97f. Dissertação (mestrado em geografia). Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SANTOS, L.M.M. **Avaliação ambiental de processos industriais**. São Paulo- SP. Signus Editora, 2006.

SANTOS, A.R.; VAREJÃO, A.S. ; SILVA, K.G. **Modelagem do impacto da ampliação da Avenida Fernando Ferrari (Vitória - ES) na qualidade do ar em sua redondeza**. UFES – Vitória/ES – Brasil. 2011.

SANTOS, S.R.Q. et al. Regime térmico e hídrico do solo para área de floresta tropical em anos de El Niño e La Niña, Caxiuana-PA: estudo de caso. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.26. n.3. p.367 – 374. 2011.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. [S.l.]: Ed. John Wiley & Sons, 1326p.1998.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE (SEMA). **Parecer técnico da Usina Termoeletrica de Barcarena - PA**. Belém, PA, 2007a.

_____. **Parecer técnico – PT 2119/DIPI/CODAP/DMA/2007**. Belém, PA, 2007b.

_____. **Documento nº 33617/2011**. GEIND/DILAP. Belém, PA, 2011.

SOARES, P.S.M, SANTOS, M.D.C, POSSA, M.V. **Carvão brasileiro: tecnologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2008.

SOUZA, E. B. et al. On the influences of the El Niño, La Niña and atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1988. **Acta Amazônica**. v. 30. n. 2. p. 305-318. 2000.

SICARD, P. et al. Air quality trends and potential health effects: development of an aggregate risk index. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 5, p. 1145-1153, 2011.

SILVA JUNIOR, J. A. et al. Variação sazonal de variáveis meteorológicas em ecossistema de manguezal na Região Bragantina - PA.. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIII, 2004, Fortaleza, **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.

THÉ, J. L. **AERMOD COURSE gaussian plume air dispersion model. Air dispersion modeling**. Workshop, São Paulo, SP, 2011a. (Notas de aula)

THÉ, J. L. **Air dispersion modeling**. Workshop. Ontario: Lakes Environmental software Inc. 2011b. (Course Notes).

TRESMONDI, A.C.C.L. et al. Concentração de material particulado inalável MP10 em Espírito Santo do Pinhal – SP. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 133-144, 2008.

VELLOSO, M.F.A. **Avaliação de modelos gaussiano para fins regulatórios – um estudo para a Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**, Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2ªed, 2011.

ZILBERMAN, I. **Introdução à engenharia ambiental**. Canoas: Editora Ulbra. 2002.

ZURITA, M.L.L.; TOLFO, A.M. **A Qualidade do ar em Porto Alegre**. Porto Alegre: Secretaria Municipal de Meio Ambiente, 2000.