UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

Elizabeth Linda Miranda Gomes

Saulo Biasutti

Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES

VITÓRIA

2012

Elizabeth Linda Miranda Gomes

Saulo Biasutti

Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau em Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr. Neyval Costa Reis Junior.

Co-Orientadora: Prof.ª Dr.ª Jane Méri Santos

VITÓRIA

2012

"O mundo tornou-se perigoso, porque os homens aprenderam a dominar a natureza, antes de dominarem a si mesmos."

(Albert Schweitzer)

AGRADEÇIMENTOS

À Deus pela esperança renovada diante de cada obstáculo,

Às nossas famílias por todo o apoio incondicional,

Ao nosso orientador Neyval Costa Reis Júnior pelos ensinamentos, pelo estímulo e críticas construtivas,

À nossa co-orientadora Jane Méri Santos por toda contribuição dada e pelo interesse demonstrado pela pesquisa,

Ao IEMA, e especialmente ao Alexsander Barros Silveira, por nos fornecer dados das estações meteorológicos e de monitoramento da qualidade do ar,

Aos nossos amigos do Laboratório de Qualidade do Ar da UFES, em especial ao Alexandre Magalhães Santiago, Edilson Luiz Nascimento e Nadir Salvador por estarem sempre dispostos a ajudar,

Ao Maurício Soares que indiretamente nos apoio na elaboração do projeto e pelo material técnico compartilhado,

À todos os profissionais envolvidos no Departamento de Engenharia Ambiental que nos auxiliaram no decorrer de toda nossa vida acadêmica,

À turma de graduação de Engenharia Ambiental de 2007 pelo aprendizado em conjunto,

E a todos que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

O estado do Espírito Santo está em um período de crescimento econômico e o município de Anchieta o acompanha com uma expansão industrial, promovia pela sua localização estratégica no setor logístico. Os benefícios econômicos advindos destes empreendimentos são evidentes, entretanto, o desenvolvimento desses grandes centros industriais, sem o planejamento adequado, expõe a população aos altos níveis de poluição atmosférica. A partir dessa problemática, o objetivo desejado neste trabalho é avaliar a qualidade do ar atual da região, além de verificar a contribuição das fontes industriais e móveis para os níveis de concentração dos poluentes atmosféricos no local. Este estudo tem ainda como objetivo comparar os resultados obtidos pelo uso dos modelos AERMOD e CALPUFF, ambos recomendados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) para fins regulatórios. O poluente adotado como referência para essas análises foi o Material Particulado com diâmetro de até 10 μm (PM_{10}) e os dados de emissões dos poluentes foram retirados do inventário de fontes da Samarco Mineração S.A. Para validação da modelagem, os valores das concentrações previstas nos modelos foram comparados, por meio de índices estatísticos, com os valores observados nas estações de qualidade do ar próximas ao empreendimento. Observou-se melhor desempenho do CALPUFF na simulação da qualidade do ar na região, embora ambos os modelos subestimem as concentrações nas estações. Com base no índice de qualidade do ar (IQA) para PM_{10}, nota-se pelas simulações realizadas que a qualidade do ar local é considerada “Boa” em todo o domínio estudado, salvo a região do empreendimento da Samarco e das comunidades de Mãe-bá e Ubú, que apresentam qualidade na categoria “Regular”.

Palavras Chave: Qualidade do ar, AERMOD, CALPUFF, município de Anchieta.

ABSTRACT

The State of Espírito Santo is in a period of economic growth and the city of Anchieta follows it with an industrial expansion, promoted by its strategic location in the logistics sector. The economic benefits arising from these developments are evident; however the development of these large industrial centers, without proper planning, exposes the population to high levels of air pollution. From this problematic, the desired goal in this work is to evaluate the current air quality in the region, and to identify the contribution of industrial and mobile sources for the concentration levels of air pollutants in the area. This study also aimed to compare the results obtained by the use of AERMOD and CALPUFF models, both recommended by the United States Environmental Protection Agency (EPA) for regulatory purposes. The pollutant adopted as reference to these analyses was the particulate material with diameter of up to 10 μm (PM10) and polluting emissions data were taken from the inventory of sources of Samarco Mineração S.A.For modeling validation, the values of concentrations provided in the models were compared with the values observed in the air quality stations through statistical analyses. We observed a better performance of CALPUFF to simulate air quality in the region, although both models underestimate the concentrations at the stations. Based on air quality index (AQI) for PM10, we can observe by simulations that the local air quality is considered "good" throughout the area studied, except for the area of Samarco and the community of Mãe-bá and Ubu, which have "Regular" quality.

Keywords: Air Quality, AERMOD, CALPUFF, city of Anchieta.

Figura 1 – Brisa marítima e brisa terrestre 27
Figura 2 – Brisa do vale e brisa da montanha 27
Figura 3 - Aproximação da distribuição da pluma na camada limite convectiva..... 37
Figura 4 - Tratamento da pluma na Camada Limite Convectiva pelo modelo AERMOD. 38
Figura 5 - Atividades das três etapas do pré-processador AERMET 40
Figura 6 - Representação de uma pluma pela aproximação do tipo *puff*..... 47
Figura 7 - Transporte do *puff* em diferentes instantes de tempo. 47
Figura 8 - Fluxograma simplificado dos pré-processadores do modelo CALMET. 50
Figura 9 - Dados cartográficos da área de estudo..... 55
Figura 10 - Topografia da região de estudo..... 57
Figura 11 - Precipitação média mensal acumulada. 58
Figura 12 - Temperatura média mensal. 59
Figura 13 - Umidade relativa média mensal..... 59
Figura 14 – Rosas dos Ventos da estação do Porto de 2010. 60
Figura 15 – Rosas dos ventos por estação 61
Figura 16 - Distribuição da frequência da classe de ventos. 62
Figura 17 - Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar na região. 63
Figura 18 - Evolução da concentração anual de PTS (µg/m³)..... 64
Figura 19 - Evolução da concentração anual de PM10 (µg/m³)..... 64
Figura 20 - Evolução da concentração anual de SO2 (µg/m³) 65
Figura 21 - Contribuição média percentual das fontes para PTS em 2007 em Ubú..... 67
Figura 22- Contribuição média percentual das fontes para PM10 em 2007 em Mãe-bá. 67
Figura 23 – Uso e ocupação do solo em Anchieta 68
Figura 24- Área de influência direta (AID) da Samarco Mineração. 70
Figura 25– Variação horária das emissões de PM10 das fontes moveis 71
Figura 26- Variação horária das emissões de PTS das fontes moveis n 72
Figura 27 - Taxas de emissões anuais nas áreas de influência direta e indireta da Samarco. .. 72
Figura 28 – Malha de receptores a..... 74
Figura 29 – Fluxograma da modelagem de fontes por tipos 77
Figura 30 – Vias externas e internas do inventário de emissões da Samarco 80
Figura 31 – Modelagem de fontes móveis. 82
Figura 32 – Modelagem de uma fonte volumétrica..... 85
Figura 33 - Concentrações médias de 24 horas de PM10 em 2010, usando AERMOD 106
Figura 34 - Concentrações média anual de PM_{10} em 2010, usando AERMOD. 107

Figura 35 - Concentrações médias de 24 horas de PM_{10} em 2010, usando CALPUFF. 108
Figura 36 - Concentrações média anual de PM_{10} em 2010, usando CALPUFF. 109
Figura 37 - Análise dos resultados obtidos para o AERMOD e CALPUFF 112
Figura 38 - Concentrações médias de 24 horas de PM_{10} para as fontes industriais 113
Figura 39 - Concentrações médias anuais de PM_{10} para as fontes industriais. 114
Figura 40 – Concentrações médias de 24h para PTS 115
Figura 41- Concentrações médias Anuais de PTS 116
Figura 42 - Classificação da região de estudo segundo o IQA considerando PM10. 117
Figura 43 - Classificação da região de estudo segundo o IQA considerando PTS. 118
Figura 44 - Concentrações médias de 24 horas de PM_{10} para o período de Verão usando o modelo AERMOD. 129
Figura 45 - Concentrações máximas médias de 24 horas de PM_{10} para o período de Verão usando o modelo CALPUFF. 130
Figura 46 - Concentrações médias de PM_{10} para o período de verão usando o AERMOD... 131
Figura 47 - Concentrações médias de PM_{10} para o período de Verão usando o modelo CALPUFF. 132
Figura 48 - Concentrações máximas médias de 24 horas de PM_{10} para o período de Inverno usando o modelo AERMOD 133
Figura 49 - Concentrações máximas médias de 24 horas de PM_{10} para o período de Inverno usando o modelo CALPUFF. 134
Figura 50 – Concentrações médias de PM_{10} para o período de Inverno usando o modelo AERMOD. 135
Figura 51 - Concentrações médias de PM10 para o período de Inverno usando o modelo CALPUFF. 136
Figura 52 - Concentrações de PM10 medidas na estação de Ubú e calculadas pelos modelos AERMOD E CALPUFF. 137
Figura 53 - Concentrações de PM_{10} calculada pelo AERMOD em µg/m³. 138
Figura 54 – Análise da qualidade do ar na região considerando as recomendações da OMS para PM_{10} nas médias de 24 horas usando o modelo CALPUFF. 140
Figura 55 – Análise da qualidade do ar na região considerando as recomendações da OMS para PM_{10} na média anual usando o modelo CALPUFF. 141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Padrões nacionais de qualidade do ar 22
Quadro 2 - Faixas de Concentrações dos Poluentes para o cálculo do IQA. 24
Quadro 3 - Poluentes monitorados em cada estação da qualidade do ar em Anchieta..... 64
Quadro 4 - Fontes inventariadas nas áreas de influência da Samarco Mineração..... 69
Quadro 5 – Localização das vias externas e internas à Samarco..... 80
Quadro 6 - Procedimento para obtenção das dimensões iniciais..... 86
Quadro 7 - Variáveis consideradas no pré-processador AERMET..... 87
Quadro 8 – Observações meteorológicas do CALMET..... 91
Quadro 9 - entradas e saídas do processador CALMET. 97
Quadro 10 - entradas e saídas do processador CALPUFF. 100
Quadro 11 - entradas e saídas do pós - processador CALSUM. 101
Quadro 12 - entradas e saídas do pós - processador CALPOST 102
Quadro 13 - Diretrizes da OMS para PM10. 139
Quadro 14 - Escala Beaufort 145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Razão entre as concentrações de PM10 e PTS para os anos de 2006 a 2010. 65
Tabela 2 - Dados de caracterização da estação meteorológica do Porto. 76
Tabela 3 - Parâmetros de superfície 87
Tabela 4- Análise estatística dos resultados do AERMOD e CALPUFF quanto a PM_{10}.. 111
Tabela 5 - Análise estatística dos resultados com dados de reanálise e dados do aeroporto..127
Tabela 6- Análise estatística dos resultados com Fonte área e areapoly no AERMOD.....128
Tabela 7 - Análise estatística dos resultados do AERMOD e CALPUFF quanto a PTS. 144

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13

2. OBJETIVOS 16

2.1. OBJETIVO GERAL 16

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

3.1. POLUIÇÃO DO AR 17

3.2. PRINCIPAIS POLUENTES E SEUS EFEITOS NA SAÚDE 18

3.2.1. Material Particulado 18

3.2.2. Dióxidos de Enxofre (SO_2) 19

3.2.3. Monóxidos de Carbono (CO) 19

3.2.4. Óxidos de Nitrogênio (NO_x) 20

3.2.5. Ozônio Troposférico 20

3.2.6. Hidrocarbonetos (HC) 20

3.3. LEGISLAÇÃO NACIONAL APLICÁVEL A QUALIDADE DO AR 20

3.4. PADRÕES E ÍNDICES DE QUALIDADE DO AR 21

3.5. INVENTÁRIO DE FONTES 25

3.6. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA 25

3.5.1. Influência dos Ventos 26

3.5.2. Brisa Marítima e Terrestre 26

3.5.3. Ventos em Vales 27

3.5.4. *Building Downwash* (Efeito da Presença de Edificações) 27

3.5.5. Influência da Estabilidade Atmosférica 28

3.5.6. Influência do Terreno 29

3.7. ESTUDOS DA MODELAGEM DA QUALIDADE DO AR 30

4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS 34

4.1. AERMOD 35

4.1.1. Formulação Matemática 37

4.1.2. Descrição do pré-processador AERMET 40

4.1.3. Dados de entrada para o AERMET 40

4.1.4. Dados de saída do AERMET 41

4.1.5. Descrição do pré-processador AERMAP 42

4.1.6. Dados de entrada para o AERMAP 43
4.1.7. Dados de saída do AERMAP 43
4.1.8. Modelagem de fontes no AERMOD 43
4.1.9. Fonte Pontuais 44
4.1.10. Fonte Área 44
4.1.11. Fonte Volumétrica 45
4.1.12. Fonte Areapoly 45
4.1.13. Fonte Areacirc 45
4.2. CALPUFF 46
4.2.1. Formulação matemática do modelo 46
4.2.2. Modelo meteorológico 49
4.2.3. CALPUFF 53
5. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO 55
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 56
5.1.1. Características Topográficas 56
5.1.2. Condições Meteorológicas para o ano de 2010 57
5.1.3 Caracterização da qualidade do ar 62
5.1.4. Uso e ocupação do solo 68
5.2. INVENTÁRIO DE FONTES DA REGIÃO 69
6. METODOLOGIA 74
6.1. DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL 74
6.2. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS 75
6.3. SISTEMA DE MODELAGEM AERMOD 87
6.3.1. AERMET 87
6.3.2. AERMAP 88
6.3.3. AERMOD 88
6.4. SISTEMA DE MODELAGEM CALPUFF 89
6.4.1. CALMET 90
6.4.2. CALPUFF 98
6.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA 102
7. RESULTADO E DISCUSSÕES 106
7.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR 106
A) Resultados do AERMOD 106

B) Resultados do CALPUFF 108
7.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA 109
8. CONCLUSÕES 119
9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 121
10. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 122
APÊNDICE A – Teste de sensibilidade para dados meteorológicos de altitude **..... 126**
APÊNDICE B - Teste de Sensibilidade Fontes Área e Fontes Polyarea **..... 128**
APÊNDICE C – Variação das concentrações de PM_{10} no Inverno e Verão em 2010. **..... 129**
APÊNDICE D – Análise da Série de Tempos Calculada e Observada **..... 137**
APÊNDICE E – Avaliação da qualidade do ar segundo as diretrizes da OMS **..... 139**
APÊNDICE F – Análise estatística dos resultados de PTS **..... 142**
ANEXO A - Escala Beaufort **..... 145**

1. INTRODUÇÃO

A Organização Mundial de Saúde (OMS) considera ar limpo como um requisito básico de saúde e bem-estar da população. Ainda, segundo a Constituição Federal Brasileira, todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida (Art. 225, do Capítulo VI do Título VIII). Entretanto, observa-se que um dos impactos mais representativos na sociedade atual é a alteração da qualidade do ar.

Diante dessa problemática ambiental e do entendimento de ambiente como bem comum, faz se necessário ao Estado criar instrumentos legais para assegurar o direito de ambiente ecologicamente equilibrado a todos os cidadãos. Como exemplo desses instrumentos legais, pode-se citar a obrigatoriedade da realização de estudos de impacto ambiental anterior à instalação de grandes empreendimentos numa região. Nesses estudos, a avaliação da viabilidade ambiental do empreendimento, quanto ao impacto "Alteração da qualidade do ar", utiliza-se além de dados de monitoramento da qualidade do ar, os Modelos de Qualidade do Ar (MQAr) (SOARES, 2010).

Os MQAr são capazes de simular a dispersão das emissões gasosas provenientes das instalações e assim predizer as concentrações a que a população do entorno estará exposta. Os resultados obtidos da modelagem ao serem comparados aos níveis de qualidade exigidos pelas legislações ambientais competentes auxiliam na concessão de permissões para instalação de futuros parques industriais (NEDEL, 2003).

No município de Anchieta, por exemplo, a utilização de modelos de qualidade do ar é aplicável por se tratar de um local que vive um momento de expansão industrial, impulsionado pela sua localização estratégica e sua infraestrutura portuária (VIEIRA e LOUREIRO, 2010). Hoje, na região, estão localizados empreendimentos de grande porte, como o Complexo Industrial e Portuário da Samarco e a Unidade de Tratamento de Gás do Sul Capixaba (UTG-Sul) da Petrobras. Ainda, há previsão de instalar-se no local um pólo industrial e de serviços, com destaque para os grandes empreendimentos como a Companhia Siderúrgica de Ubú (CSU). Além disso, os atuais empreendimentos já demonstram interesse em expandir suas instalações no local.

Os benefícios dos projetos são inúmeros, já que esses poderão acelerar o desenvolvimento econômico da região. Contudo, são atividades de grande porte, instaladas próximo à área urbana, e um planejamento acautelado é necessário de modo a amenizar os prováveis

impactos ambientais e socioculturais no município (ABE, 2006). Assim pode-se afirmar que o porvir para o município de Anchieta se apresenta grandemente desafiador.

A maioria desses empreendimentos emite uma variedade considerável de poluentes atmosféricos e, portanto, os impactos na qualidade do ar local devem ser avaliados por meio de estudos criteriosos, combinando técnicas de monitoramento e de modelagem computacional, como uma ferramenta de apoio na estimativa de concentração de poluentes na atmosfera (SOARES, 2010).

Os modelos American Meteorology Society-Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD) e o Californian *Puff* Model (CALPUFF) são recomendados pelos órgãos ambientais internacionais para uso no licenciamento de instalações industriais. Para fins regulatórios, o AERMOD é adotado para uso em um domínio de até 50 km, enquanto o CALPUFF é adotado para simulações em domínio além de 50 km (EPA, 2005).

No entanto, há atualmente um debate na comunidade científica sobre a relevância da utilização do CALPUFF para situações nas proximidades das fontes de emissão, pois este modelo apresenta tratamentos físicos que não são incorporados nos modelos Gaussianos tradicionais como o ISC3 e o AERMOD (CUNHA *et al*., 2009).

No Brasil, a legislação ambiental vigente não faz referência a qual tipo de modelo utilizar nos estudos de impacto ambiental e, consequentemente, os modelos Gaussianos (ISC-3, AERMOD e outros) acabam sendo indiscriminadamente utilizados, até mesmo em situações de notória não aplicabilidade dos mesmos (VEGA DO SUL, 2001 apud MORAES, 2004). Como exemplo, Moraes (2001) destaca que modelos baseados na abordagem clássica gaussiana, como o AERMOD, quando aplicados em regiões de terreno complexo e turbulência não homogênea, fica muito difícil a obtenção de resultados confiáveis. Já o CALPUFF, apesar de ser um modelo gaussiano, foi desenvolvido para as aplicações sobre terreno complexo e turbulência não homogênea, apresentando resultados mais realísticos em suas simulações. Neste contexto, a escolha de um modelo está diretamente ligada ao problema que se pretende resolver e ao conhecimento da área de estudo, ambos do ponto de vista geográfico e meteorológico (SOARES, 2010).

Diante das informações apresentadas e da relevância do tema, este trabalho consiste na análise do desempenho dos modelos AERMOD e CALPUFF para o município de Anchieta. Para isso, utiliza-se de indicadores estatísticos para comparar as concentrações obtidas da

modelagem e as concentrações medidas nas estações de monitoramento para o poluente de referência: Material Particulado com diâmetro de até 10 µm (PM_{10}). O estudo fornecerá melhor compreensão dos mecanismos de transporte de poluentes na atmosfera local e adicionalmente contribuirá para a qualificação dos modelos como uso regulatório e rotineiro na região, subsidiando futuros projetos de planejamento urbano e industriais em Anchieta.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é a avaliar comparativamente a adequação dos modelos de dispersão atmosférica AERMOD e CALPUFF no município de Anchieta-ES, de modo a dar suporte na escolha do modelo mais eficaz para fins regulatórios.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os resultados dos modelos CALPUFF e AERMOD, a fim de avaliar a acurácia destes modelos para as condições meteorológicas e topográficas da região;
- Avaliar a contribuição das fontes industriais para a qualidade do ar local;
- Avaliar a qualidade do ar na região de Anchieta, quanto aos poluentes PM10 e PTS, comparando as médias das concentrações dos poluentes simulados com os padrões de qualidade do ar da Resolução CONAMA 03/90 e com as recomendações da OMS;
- Caracterizar a região segundo os Índices de Qualidade do Ar (IQA).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos básicos relativos à poluição do ar e a modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera.

A princípio é apresentada a definição de poluição ambiental e a relação dos principais poluentes atmosféricos. Posteriormente, os efeitos respiratórios consequentes à degradação da qualidade do ar, são relatados de forma sucinta visando, essencialmente, alertar para a importância do tema. Ainda, nesta primeira etapa, são apresentadas as principais legislações referentes ao assunto.

Nos tópicos seguintes, os temas abordados tratam especificamente de dispersão atmosférica, revisando os diversos fatores de influência que devem ser considerados na análise dos resultados da modelagem. Por fim, são apresentados estudos de casos que utilizaram os modelos de qualidade do AERMOD e/ou CALPUFF.

3.1. POLUIÇÃO DO AR

A poluição do ar é hoje um assunto exaustivamente discutido mundialmente, devido à relevância do tema. Segundo a OMS (2005), poluição atmosférica pode ser definida como a introdução de qualquer forma de matéria ou energia responsável pela degradação da qualidade do ar em concentrações nocivas ou ofensivas à saúde humana, passíveis de danos aos recursos naturais interferindo no legítimo uso do meio ambiente.

Ainda, segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 03 de 28 de junho de 1990, poluente atmosférico também é “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os niveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e a flora ou prejudicial à seguranca, ao uso e gozo da propriedade e as atividades normais da comunidade”.

Estas substâncias podem ser resultantes da atividade humana ou de processos naturais. Exemplos de fontes naturais de poluição do ar são a queima acidental de biomassa e erupções vulcânicas, as quais podem ser consideradas as mais antigas fontes de contaminação do ar. Já as fontes antropogênicas de poluição atmosférica são diversas, entre elas pode-se destacar a queima de combustíveis fósseis para produção de energia (CANÇADO *et al.*, 2006).

Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (seres humanos, outros animais, plantas, materiais) como resultado final do processo de lançamento deste poluente na atmosfera a partir de suas fontes de emissão e suas interações na atmosfera, do ponto de vista físico (diluição) e químico (reações químicas) (CETESB, 2010).

3.2. PRINCIPAIS POLUENTES E SEUS EFEITOS NA SAÚDE

A determinação sistemática da qualidade do ar, por questões de ordem prática, deve ser limitada a um restrito número de poluentes, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis. Neste sentido, e de forma geral, a escolha recai sobre um grupo de poluentes consagrados universalmente, que servem como indicadores de qualidade do ar, sendo esses: Dióxido de Enxofre (SO2); Material Particulado; Monóxido de carbono (CO); Oxidantes fotoquímicos; Hidrocarbonetos Totais (HC) e Óxidos de Nitrogênio (NOx). A razão da seleção destes parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior freqüência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente e a saúde humana (CETESB, 2010).

Em virtude disso, são apresentados nos tópicos seguintes as principais características desses poluentes atmosféricos e seus efeitos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

3.2.1. Material Particulado

O material particulado é uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar. Sua composição e tamanho dependem das fontes de emissão. As partículas podem ser divididas em dois grupos: partículas grandes (*coarse mode*), emitidas através de combustões descontroladas, dispersão mecânica do solo ou outros materiais da crosta terrestre (polens, esporos e materiais biológicos também se encontram nesta faixa de tamanho); e partículas pequenas (*fine mode*), emitidas pela combustão de fontes móveis e estacionárias, como automóveis, incineradores e termoelétricas, que por serem de menor tamanho e mais ácidas, podem atingir porções mais inferiores do trato respiratório (CANÇADO *et al.*, 2006).

As Partículas Totais em Suspensão (PTS) são partículas de material solido ou liquido, na faixa de tamanho menor que 100 μm, e que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Estas partículas apresentam como principais efeitos no meio ambiente, danos a vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo

(CETESB, 2010). Além disso, pode causar danos estéticos (manchas e danificações de rochas e outros materiais).

As partículas inaláveis grossas, de diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm (PM_{10}), são as que causam maiores prejuízos à saúde, uma vez que não são retidas pelas defesas do organismo. Essas podem causar irritação nos olhos e na garganta, reduzindo a resistência às infecções e ainda provocando doenças crônicas. Além disso, atingem as partes mais profundas dos pulmões, transportando para o interior do sistema respiratório substâncias tóxicas e cancerígenas (IEMA, 2007). Ainda existem as chamadas partículas inaláveis finas ($PM_{2,5}$), com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 μm, que penetram mais profundamente no trato respiratório, causando maiores danos a saúde humana. Para esta classe de partículas não existe ainda um padrão na legislação nacional.

3.2.2. Dióxidos de Enxofre (SO_2)

Estes poluentes são resultantes principalmente da combustão de elementos fósseis, como carvão e petróleo e têm como fontes principais os automóveis e as termoelétricas. Uma vez lançado na atmosfera, o dióxido de enxofre pode ser transportado para regiões distantes das fontes primárias de emissão, o que aumenta sua área de atuação (CANÇADO *et al.*, 2006). A inalação, mesmo em concentrações muito baixas, provoca espasmos passageiros dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares. Em concentrações progressivamente maiores, causam o aumento da secreção mucosa nas vias respiratórias superiores, inflamações graves da mucosa e redução do movimento ciliar do trato respiratório. Pode, ainda, aumentar a incidência de rinite, faringite e bronquite (IEMA, 2007). Quando na presença de vapor de água, passa rapidamente a H_2SO_4, podendo levar a formação de chuva ácida e causar corrosão aos materiais e danos à vegetação (CETESB, 2010).

3.2.3. Monóxidos de Carbono (CO)

Os monóxidos de carbono são resultantes da combustão incompleta dos combustíveis fósseis nos veículos automotivos, nos aquecedores a óleo, churrasqueiras, fogões a gás e na queima de tabaco (CANÇADO *et al.*, 2006). A molécula deste gás combina-se rapidamente com a hemoglobina, ocupando o lugar do oxigênio. Como consequência ocorre diminuição da capacidade do sangue de transportar oxigênio, podendo levar a morte por asfixia. A exposição crônica pode causar prejuízos ao sistema nervoso central, cardiovascular, pulmonar e outros. Também pode afetar fetos causando peso reduzido no nascimento e desenvolvimento pós-natal retardado (IEMA, 2007).

3.2.4. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

As principais fontes de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) são os motores dos automóveis e, em menor escala, as usinas termoelétricas, indústrias, fogões a gás, aquecedores que utilizam querosene (mais freqüentes em regiões frias) e o cigarro. O dióxido de nitrogênio, na presença de luz solar, reage com hidrocarbonetos e oxigênio formando ozônio, sendo um dos principais precursores deste poluente na troposfera (CANÇADO *et al.,* 2006). O NO_2, por ser um agente oxidante, é altamente tóxico ao homem, pois aumenta sua susceptibilidade aos problemas respiratórios em geral. Além disso, é irritante às mucosas e, quando inalado, podem ser transformados em nitrosaminas, algumas das quais são carcinogênicas (IEMA, 2007). Assim como o SO_2, os óxidos de nitrogênio, quando na presença de vapor de água, podem levar a formação de chuva ácida e causar corrosão aos materiais e danos à vegetação (CETESB, 2010).

3.2.5. Ozônio Troposférico

Como foi dito anteriormente, o ozônio troposférico é produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (CETESB, 2010). Este poluente provoca danos na estrutura pulmonar, reduzindo sua capacidade e diminuindo a resistência às infecções. Causa ainda, o agravamento de doenças respiratórias, aumentando a incidência de tosse, asma, irritações no trato respiratório superior e nos olhos. Em relação ao meio ambiente,o ozônio é agressivo às plantas, agindo como inibidor da fotossíntese e produzindo lesões características nas folhas (IEMA, 2007).

3.2.6. Hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos são resultantes da combustão incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis. Participam da formação de oxidantes fotoquímicos na atmosfera, juntamente com os óxidos de nitrogênio. Causam irritação aos olhos, nariz, pele e trato respiratório superior. Além disso, vários hidrocarbonetos são considerados carcinogênicos e mutagênicos (IEMA, 2007).

3.3. LEGISLAÇÃO NACIONAL APLICÁVEL A QUALIDADE DO AR

A primeira tentativa a nível nacional de estabelecer o controle sobre as emissões de poluentes aéreos deu-se a partir da edição da Portaria n°. 231 de 27 de abril de 1976 do Ministério do Interior. Nesta portaria foram estabelecidos níveis de concentração máximas permitidas através de padrões de emissão, com o objetivo de proteger a população e criar metas que

deveriam nortear os planos regionais de controle da poluição do ar. Tais padrões foram trazidos da legislação americana (até então a mais desenvolvida a nível mundial), e fracamente adaptadas à realidade brasileira (SANTOS, 1996).

Em meados da década de 80, diante da pressão causada por denúncias de problemas ambientais ocorridos em todo o Brasil, foram sendo criados programas para o controle da poluição ambiental (FURLAN, 1998).

No ano de 1989 é instituído o PRONAR - Programa Nacional de Controle da Qualidade do AR, a partir da resolução CONAMA 05. Com a instituição do PRONAR o governo federal visou reduzir os efeitos ambientais negativos da poluição atmosférica a nível nacional, principalmente nas regiões metropolitanas. A estratégia básica do programa é limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle (CONAMA, 1989). Ou seja, os padrões de qualidade serão objetivo a ser atingido mediante estratégia fixada pelo padrão de emissão nas fontes (SANTOS, 1996). Estes instrumentos seriam mais bem definidos nas Resoluções CONAMA seguintes.

Ainda durante os anos 80, surgiu a Resolução CONAMA Nº 18/86, que estabeleceu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. As ações implementadas por este programa resultaram na redução significativa de emissão dos poluentes emitidos pelos veículos automotores (CETESB, 2010).

Por meio da Resolução CONAMA Nº 03, de 28 de junho de 1990, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar e os respectivos métodos de referência. Enquanto que na Resolução CONAMA Nº 08, também de 1990, o IBAMA fixou padrões de emissão para fontes fixas baseados em processos de combustão externa, que constituem o maior contingente de fontes poluentes industriais a nível nacional. Nessa resolução, são fixados ainda diferentes limites para plantas industriais por potência total (SANTOS, 1996).

3.4. PADRÕES E ÍNDICES DE QUALIDADE DO AR

Um padrão de qualidade do ar (PQAR) especifica legalmente o limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem-estar da população, bem como da fauna, flora, materiais e do meio ambiente em geral; sendo que a

máxima concentração de um poluente é determinada em função de um período médio de tempo (IEMA, 2007).

Como foi dito anteriormente, os PQAR foram fixados na resolução CONAMA Nº03/90. Essa resolução apresenta dois tipos de padrões de qualidade do ar:

> a) Padrões Primários: são as concentrações de poluentes presentes no ar que, ultrapassados, poderão afetar à saúde. Nesses, inclui-se, uma margem de segurança para proteger a população mais sensível como crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios. Assim, esses podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos.
>
> b) Padrões Secundários: são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Dessa forma, esses, podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes a longo prazo.

O objetivo do estabelecimento de padrões secundários é criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar.

Os padrões nacionais de qualidade do ar regulamentados são apresentados no Quadro 1:

QUADRO 1- PADRÕES NACIONAIS DE QUALIDADE DO AR (RESOLUÇÃO CONAMA Nº 03 DE 28/06/90)

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário µg/m³	Padrão secundário µg/m³	Método de medição
Partículas totais em suspensão	24 horas[1]	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA[2]	80	60	
Partículas inaláveis	24 horas[1]	150	150	Separação inercial/Filtração
	MAA[3]	50	50	
Fumaça	24 horas[1]	150	100	Refletância
	MAA[3]	60	40	
Dióxido de enxofre	24 horas[1]	365	100	Pararosanilina
	MAA[3]	80	40	
Dióxido de nitrogênio	1 hora	320	190	Quimiluminescência
	MAA[2]	100	100	
Monóxido de carbono	1 hora[1]	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo
		35 ppm	35 ppm	
	8 horas[1]	10.000	10.000	
		9 ppm	9 ppm	
Ozônio	1 hora[1]	160	160	Quimiluminescência

1. Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.
2. Média geométrica anual
3. Média aritmética anual

Fonte: (CETESB, 2010)

O rigor adotado nesses padrões, em termos de vigilância da qualidade do ar, é que o padrão médio anual não deve ser excedido nenhuma vez e os padrões horários não devem ser excedidos mais do que uma vez ao ano (CETESB, 2010).

Os índices de qualidade do ar (IQA) são subdivisões em faixas de concentrações para cada poluente e essas são classificadas por cores que indicam os efeitos que os poluentes causam à saúde humana, e tempo de exposição, subdividindo em intervalos calculados pelas médias móveis das últimas 24h para os poluentes PTS, PM_{10} e SO_2, 1h para os poluentes NO_2 e O_3 e 8h para o CO (IEMA, 2007).

A estrutura do IQA é obtida através de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar. Desta função, que relaciona a concentração do poluente com o valor índice, resulta um número adimensional referido a uma escala com base em padrões de qualidade do ar. Para cada poluente medido é calculado um índice. O desenvolvimento do IQA é baseado em estudos feitos pela Agência de Proteção Ambiental Americana - EPA e estão apresentados nos relatórios "*Pollutant Standards Index*" EPA-454/R-00-005 (CETESB, 2010).

A relação entre o IQA e efeitos à saúde é apresentado no Quadro 2.

QUADRO 2 - FAIXAS DE CONCENTRAÇÕES DOS POLUENTES PARA O CÁLCULO DO IQA.

Qualidade	Índice	MP10 (µg/m³)	O3 (µg/m³)	CO (ppm)	NO2 (µg/m³)	SO2 (µg/m³)	Fumaça (µg/m³)	PTS (µg/m³)	Significado
Boa	0-50	0-50	0-80	0-4,5	0-100	0-80	0-60	0-80	Praticamente não há riscos a saúde.
Regular	51-100	>50-150	>80-160	>4,5 - 9	>100 - 320	>80-365	>60-150	>80 - 240	Pessoas de grupos sensíveis* podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
Inadequada	101-199	>150 e <250	>160 e <200	>9 e <15	>320 e <1130	>365 e <800	>150 e <250	>240 e <375	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis* podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Má	200-299	≥250 e <420	≥200 e <800	≥15 e <30	≥1130 e <2260	≥800 e <1600	≥250 e <420	≥375 e <625	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.
Péssima	≥300	≥420	≥800	≥30	≥2260	≥1600	≥420	≥625	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

* Grupos sensíveis são crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas.

Fonte: (CETESB, 2010).

3.5. INVENTÁRIO DE FONTES

A EPA (1999) define a ferramenta "inventário de emissões atmosféricas" como sendo uma listagem atualizada e abrangente das emissões atmosféricas causadas por fontes ou grupo de fontes que estão localizadas numa área geográfica específica para um intervalo de tempo definido.

Os inventários de emissão servem como dados de entrada para os modelos de dispersão, permitindo a estimativa das concentrações médias dos poluentes na atmosfera local.

As fontes de emissão de partículas e/ou gases podem ser classificadas como pontuais ou extensas, de acordo com suas características físicas (IEMA, 2007):

> a) Fontes Pontuais: são aquelas que, devido às pequenas dimensões da sua área de lançamento, podem ser consideradas como um ponto em relação às demais fontes e à região impactada. Exemplos típicos de fontes pontuais são as chaminés das indústrias.
>
> b) Fontes Extensas: são aquelas que têm uma superfície significativa em relação às demais fontes e à região impactada. Exemplos de fontes extensas são as pilhas de materiais secos, as vias pavimentadas ou não e os solos descobertos ou os pontos de manuseio e estocagem de materiais. Usualmente representam um grande número de atividades que individualmente lançam pequenas quantidades de poluentes para a atmosfera, mas que coletivamente passam a ter emissões significativas.

As fontes de emissão para a atmosfera são ainda classificadas em fixas e móveis:

> a) As fontes fixas possuem posicionamento constante no tempo. Essas fontes produzem cargas pontuais e difusas de poluente, sendo tipicamente representadas pelas chaminés de exaustão, pilhas de materiais e tanques de armazenagem de líquidos orgânicos, sendo que nesse estudo foram consideradas também outras tipologias de fontes fixas, como emissões de poluentes provenientes de postos de combustíveis, aeroportos, aterros sanitários e residências.
>
> b) As fontes móveis variam sua posição ao longo do tempo, exemplificadas pelos veículos com motores de combustão. Tais fontes produzem cargas difusas de poluentes.

3.6. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Na atmosfera, os processos de dispersão de poluentes desempenham papel fundamental, pois permitem a “renovação” do ar no ambiente, fazendo com que os poluentes decorrentes das fontes naturais ou antropogênicas assumam concentrações cujos valores sejam aceitáveis para a vida humana (BARBON, 2008).

Contudo devido à intensificação da poluição do ar por fontes antropogênicas, e os consequentes problemas ocasionados sobre os diversos ecossistemas e sobre a saúde das pessoas, se tornou essencial entender o processo de dispersão dos poluentes para que pudesse prever os diferentes cenários das condições atmosféricas (BRAUER, 2004).

Pode-se dizer que a qualidade do ar de uma região é o resultado das complexas interações entre os poluentes atmosféricos e as condições meteorológicas e topográficas locais. A dispersão, portanto, é um processo extremamente complexo. Isso é devido ao fato que os escoamentos na baixa atmosfera, ou seja, na chamada camada limite planetária (CLP), são governados pela turbulência, que é resultado direto dos efeitos térmicos (correntes convectivas geradas do aquecimento solar desigual da superfície) e mecânicos (quantidade de movimento do vento horizontal, que promove das camadas de ar em contato com a superfície) (MORAES, 2001; NEDEL, 2003). Ainda segundo Moraes (2001), os efeitos da turbulência, fator principal na dispersão vertical dos poluentes, devem ser detalhados pelos modelos de dispersão para que sejam capazes de obter previsões confiáveis de contaminantes na atmosfera.

Ao lado da turbulência, a dispersão atmosférica está relacionada com a elevação do terreno, o perfil vertical da temperatura na atmosfera (estabilidade) e da movimentação das massas de ar. Desse modo, é fundamental abordar, mesmo que de forma breve, os outros fatores que influenciam a dispersão atmosférica e que devem ser considerados nas análises dos resultados da modelagem. Estes tópicos são mais bem detalhados nos tópicos seguintes.

3.5.1. Influência dos Ventos

A direção inicial do transporte dos poluentes originados de uma fonte é determinada pela direção do vento medido no local da fonte. A concentração de poluentes, originados de fontes pontuais (uma chaminé, por exemplo), é provavelmente mais sensível à direção do vento do que a qualquer outro parâmetro. Pequenos erros na estimativa da direção e intensidade do vento podem ocasionar grandes erros nas estimativas de concentrações (VINCENTINI, 2011).

3.5.2. Brisa Marítima e Terrestre

O aquecimento diferenciado entre continente e oceano promove fluxos de energia diferentes para a atmosfera, causando gradientes de pressão em determinados níveis acima da superfície, os quais impulsionam o movimento das massas ar. Este movimento gera divergência e convergência em diferentes pontos, o que faz com que se estabeleça uma célula de circulação. Durante o dia o solo costeiro esquenta mais facilmente do que a água. Como o ar morno é menos denso do que o ar frio exercendo, portanto, uma menor pressão, então durante o dia o ar logo acima do solo é pressionado para cima pelo ar frio que vem das camadas mais próximas à água para substituí-lo. Surge assim a brisa marítima. À noite o processo se inverte, pois o solo esfria mais rapidamente que a água. Isto faz com que o ar mais aquecido se

encontre agora acima do mar e este é então pressionado pelo ar frio proveniente do solo. A Figura 1 representa exemplos de brisa marítima e terrestre.

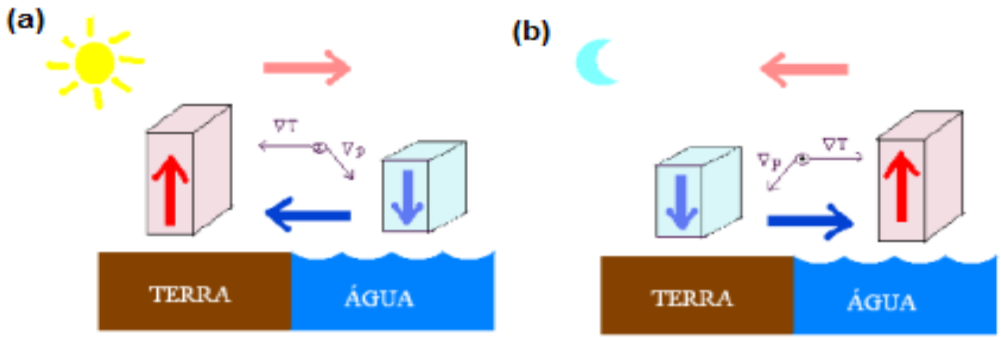


FIGURA 1 – (A) BRISA MARÍTIMA, (B) BRISA TERRESTRE
Fonte: http://mirabeli.meteo.furg.br/aulas/ClimadaTerra/artigos/brisaepoluentes.pdf

3.5.3. Ventos em Vales

De maneira análoga à brisa marítima e terrestre, o aquecimento diferenciado ao longo da superfície terrestre é responsável pelos gradientes de pressão que forçam os movimentos. O estabelecimento da brisa vale-montanha é caracterizado por mudanças nos campos de temperatura, umidade e vento. A brisa do vale *("upslope"*) é o análogo da brisa marítima e a de montanha (*"downslope"*), da brisa terrestre. A Figura 2 representa exemplos de brisa do vale e da montanha.

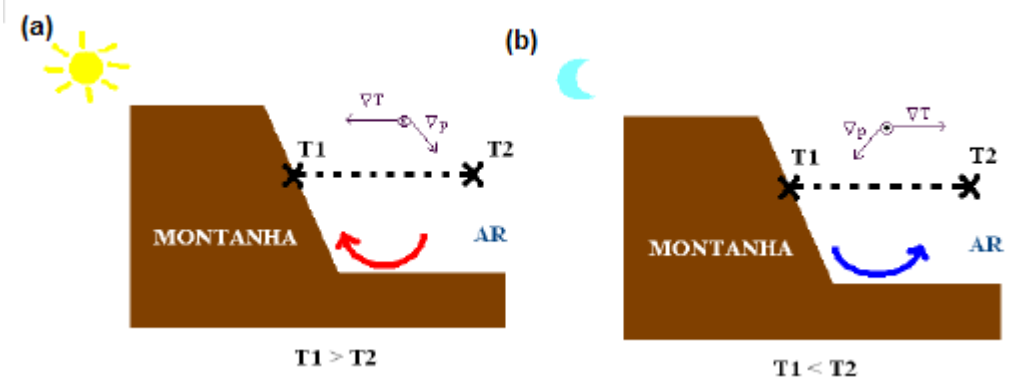


FIGURA 2 – (A) BRISA DO VALE (B) BRISA DA MONTANHA
Fonte: http://mirabeli.meteo.furg.br/aulas/ClimadaTerra/artigos/brisaepoluentes.pdf

3.5.4. *Building Downwash* (Efeito da Presença de Edificações)

Os prédios situados próximos às fontes pontuais de emissões de poluentes atmosféricos podem interferir em sua dispersão, através do impacto da pluma de poluentes nas estruturas, que pode causar uma mudança em seu curso normal, causando a queda da pluma no solo. Este efeito é denominado *building downwash* Se o poluente só sobe a uma altura menor que a

altura do prédio (ou obstáculo), e consequentemente não o ultrapassa, isso causa o aumento de sua concentração no vórtice próximo ao solo daquele obstáculo.

3.5.5. Influência da Estabilidade Atmosférica

A estabilidade da atmosfera pode ser definida como sendo a sua capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Quando ela resiste aos movimentos verticais é chamada de atmosfera estável, quando intensifica os movimentos verticais é dita atmosfera instável ou convectiva, e quando é indiferente a qualquer tipo de movimento vertical é chamada atmosfera neutra. Através do perfil de temperatura potencial na vertical, pode-se determinar o grau de estabilidade da atmosfera, e cada tipo de estabilidade atmosférica irá proporcionar uma melhor ou pior dispersão dos poluentes (MORAES, 2004).

Condições neutras são caracterizadas pela ocorrência de um perfil vertical de temperatura adiabático (aproximadamente constante com a altura). Estas condições ocorrem geralmente durante as transições do dia para noite e vice-versa, em dias nublados, ou com fortes ventos (velocidades maiores do que 6 m/s). Em atmosferas neutras, a pluma assume uma forma cônica. Nesses casos a turbulência pode ser considerada homogênea, com turbilhões de mesmo tamanho aproximadamente, atuando em todas as direções (MORAES, 2004).

Se a temperatura diminui com a altura numa taxa maior que a adiabática (neutra) então a atmosfera está instável. Para condições similares de vento, a instabilidade atmosférica é mais frequente e de maior intensidade no período diurno do que no noturno, em dias claros do que nos dias encobertos, em noites encobertas do que em noites limpas, e em dias de verão do que em dias de inverno (STERN, *et al.*, 1984 apud MORAES, 2004). Estas condições proporcionam uma forte mistura vertical dos poluentes provocada por movimentos convectivos organizados gerados pelo aquecimento solar da superfície (CARVALHO, 1999). Em atmosferas convectivas o aspecto da pluma assume uma forma serpenteante.

Condições estáveis são caracterizadas por um perfil superadiabático (aumento da temperatura com a altura). Esta condição é frequentemente encontrada na superfície, durante noites claras (céu claro), com ventos fracos. Sob esta condição, a temperatura não diminui rapidamente com a altura. Nesta camada os movimentos verticais são parcialmente limitados, e uma camada de mistura baixa é observada. Ou seja, há predominância da turbulência mecânica sobre a convectiva. (NEDEL, 2003). O aspecto da pluma em uma atmosfera estável é tubular. Sob estas condições, com ventos fracos, o poluente pode viajar a grandes distâncias mantendo altas concentrações. Modelar o transporte e dispersão de poluentes na camada estável ainda é

um dos grandes desafios da meteorologia. Baseado nessas conclusões com relação às condições de estabilidade atmosférica pode-se antecipar que condições estáveis tendem a ser desfavorável à dispersão de poluentes. Em casos extremos de estabilidade atmosférica, a inversão da temperatura impede o movimento vertical, resultando em uma inversão de camadas próxima a superfície. Onde uma camada morna de ar cobre uma camada mais fria. E devido à camada de inversão limitar a mistura vertical dos contaminantes pode-se dizer que sob esta condição a dispersão é considerada desfavorável e terá como consequência o confinamento dos poluentes próximo do solo (CUNHA, 2002).

Existem ainda situações mistas, onde o perfil de temperatura sofre uma inversão com a altura e a pluma pode ser, por exemplo, aprisionada nesta camada de inversão. É o caso da fumigação, onde uma inversão de altura impossibilita a dispersão para altitudes mais elevadas, enquanto que na camada abaixo o perfil é instável. Desta forma o poluente é disperso em direção ao solo pelas correntes descendentes os níveis de concentração ao nível do solo podem ser bem altos. Este tipo de condição ocorre geralmente pela manhã ou à noite. Outra situação bem próxima da fumigação é a chamada *trapping*. Neste caso a atmosfera encontra-se em estado neutro e logo acima, na altura da pluma, uma camada de inversão se forma. Assim os poluentes são aprisionados e se dispersam em formato cônico. O inverso deste caso é a chamada condição do tipo anti-fumegante, em que uma inversão localizada abaixo da altura da chaminé impede que os poluentes cheguem ao solo (MORAES, 2004).

3.5.6. Influência do Terreno

A complexidade do terreno é muito importante para definição de parâmetros na modelagem matemática de poluentes, pois a mesma ocasiona grandes mudanças na direção/velocidade do vento e nos fluxos turbulentos. Este fato limita a aplicação de modelos simples, os do tipo gaussianos, por exemplo, e a utilização de grandes áreas de modelagem, visto que condições de estacionariedade e homogeneidade dificilmente são encontradas. Os terrenos planos são aqueles sem nenhum tipo de elevação na vertical, ou com elevações que não influenciam significativamente o escoamento ao seu redor, gerando recirculações. Já os terrenos complexos apresentam elevações verticais são significativas a ponto de influenciar o escoamento atmosférico ao seu redor, gerando recirculações. Segundo Carvalho (1996), as principais situações que podem aumentar as concentrações em terreno complexo são: encontro da pluma com montanhas, acúmulo de poluentes em vales, arrasto dos poluentes para centros urbanos devido ao fenômeno da canalização do vento pelos vales, fenômenos já explicados quando tratada a influência do vento.

3.7. ESTUDOS DA MODELAGEM DA QUALIDADE DO AR

Soares (2010) avaliou a aplicabilidade do Sistema de Modelagem CALPUFF (SMC) em diferentes situações atmosféricas atuantes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Nas três estratégias adotadas para a modelagem, o poluente de referência foi o SO_2, por ser um poluente pouco reativo. Na primeira estratégia, o SMC foi comparado ao modelo Gaussiano AERMOD com base nos dados observados na estação de qualidade do ar localizado em Nova Iguaçu. Tal comparação compreendeu o período entre 20 de agosto e 19 de setembro de 2008. A análise comparativa dos resultados se deu a partir da avaliação dos seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (COR), erro médio quadrático normalizado (EMQN), desvio fracional padrão (FS), desvio fracional (FB) e fator de dois (FA2). Os resultados obtidos pelo SMC foram superiores aos resultados do AERMOD, sendo ainda melhores quando o refinamento de grade foi aplicado ao SMC. Isto pôde ser visto através dos índices COR (0,33 para o AERMOD e 0,58 para o SMC), EMQN (1,98 para o AERMOD e 0,43 para o SMC), FB (0,90 para o AERMOD e -0,07 para o SMC), FS (1,28 para o AERMOD e -0,42 para o SMC) e FA2 (0,33 para o AERMOD e 0,74 para o SMC), sendo este último o índice normalmente utilizado para validar os modelos de qualidade do ar, onde 1,0 é o valor ótimo. Na segunda estratégia, o SMC foi testado sob situações meteorológicas de ocorrência frequente na RMRJ (Sistema Frontal (SF) e Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), nas quais os modelos Gaussianos de abordagem clássica não são aplicáveis. O período escolhido para análise do SMC, sob atuação de um SF, variou entre 00 horas do dia 01 de junho de 2009 e 18 horas deste mesmo dia. O dia 17 de julho de 2009 foi selecionado para avaliar o SMC quando o ASAS era o sistema dominante sobre a RMRJ. O SMC simulou os padrões esperados de advecção para nordeste, quando influenciado pelo SF, e também, fenômenos como calmarias e brisas, durante o período de atuação do ASAS.Na última estratégia, o SMC foi utilizado para a análise do transporte de poluentes entre as Bacias Aéreas I, II e III da RMRJ, na intenção de avaliar o impacto integrado das emissões. Os resultados para esta estratégia levam a acreditar que existe uma interação significativa entre a qualidade do ar das Bacias Aéreas.

Velloso (2007) avaliou os modelos Gaussianos de qualidade do ar AERMOD e ISC3 para a Bacia Aérea III da RMRJ. O período considerado foi o ano de 2002. Para as simulações foram consideradas as emissões do poluente SO2 provenientes de 24 fontes fixas, representativa das atividades industriais, e representadas nas simulações por fontes áreas. As emissões referentes às atividades automotivas foram assimiladas no modelo nas simulações por fontes linhas. Os

resultados foram representados em cinco estações receptoras, onde estão localizadas as estações de monitoramento da qualidade do ar, com o objetivo de utilizar os dados observados dessas estações e compará-los aos dados previstos pelos modelos. Observaram-se regimes variados de vento, que consequentemente influenciaram nas discrepâncias entre as simulações e os dados observados das estações. As simulações mostraram que os melhores resultados foram obtidos para a estação Nova Iguaçu, estação que se encontra mais próxima da estação meteorológica usada na modelagem em relação às outras estações de qualidade do ar. Os índices estatísticos mostraram que os modelos não estão aptos para avaliar toda a região da Bacia Aérea III, pois apesar da região ser relativamente pequena, existe uma variedade de regimes de vento. Assim, resultados satisfatórios só foram obtidos para regiões próximas da principal região poluidora e da estação meteorológica usada, e a análise feita entre os modelos mostraram que estes foram similares, com tendência do ISC3 em superestimar os resultados do AERMOD.

Donaldson et. al. (2008) compararam os desempenhos dos modelos AERMOD e CALPUFF utilizando a concepção near field para o poluente material particulado emitidos por fontes fugitivas em uma região de terreno plano. Comparativamente os modelos foram configurados de três formas: (1) a mais refinada com resolução de grade de 100 m para ambos os modelos; (2) com resolução de grade de 500 m; (3) e por último a grade grosseira com uma resolução de 1 km. Em nenhuma delas foi ativado no CALPUFF o módulo de transformação química. No primeiro estudo de caso, os modelos com suas respectivas configurações foram executados sem os processos ativados de deposição seca e sedimentação. Os resultados do CALPUFF se mostraram menores quando comparados com os do AERMOD, principalmente para receptores mais distantes. Esses resultados sugerem a modelagem mais realística do CALPUFF, que é não estacionário, o que permite que cada pacote de poluente se mova no tempo e no espaço, em vez do progresso instantâneo em linha reta do poluente através do domínio como acontece no AERMOD. Na segunda análise os modelos foram executados com os processos remoção ativados. Os resultados foram bem similares aos anteriores, exceto que ambos os modelos foram em média 16% menores que os simulados no primeiro caso.

Silva e Sarnaglia (2010) analisaram a dispersão do poluente PM10 na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) utilizando o modelo CALPUFF. O domínio computacional foi definido de maneira a conter todas as fontes contempladas no inventário de fontes fornecido pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), que incluem tantos as

fontes estacionárias como as fontes móveis. Ao final chegou numa malha de 50 por 50 Km, com espaçamento de 1 Km, sendo que a capital Vitória foi tomada como centro deste domínio. As fontes industriais foram modeladas de três formas diferentes (fontes de área, pontuais e volumétricas) de acordo com suas características, enquanto que as fontes móveis foram modeladas apenas em forma de fontes de área. Para a análise estatística dos resultados usou os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (COR), erro médio quadrático normalizado (EMQN), desvio fracional (FB), fator de dois (FA2), vício e Robust Highest Concentration (RHC). Os resultados foram comparados aos dados de monitoramento das estações de Laranjeiras, Carapina, Jardim Camburi, Enseada do Suá, Vitória Centro, Vila Velha Ibes, Vila Velha Centro e Cariacica.

Para as médias horárias, os fatores de correlação encontrados encontram-se abaixo do esperado se comparados, sendo que o melhor resultado foi para à estação de Carapina para a qual o fator de correlação se aproxima de 0.17. Os valores do vício, na maioria dos casos, deram valores negativos o que indica que o modelo subestimou as concentrações do poluente. Quanto aos índices razão RHC e o FB, esses indicam o desempenho do modelo quanto as altas concentrações. Valores maiores que 1 para a razão RHC indicam sobrepredições, os menores subpredições; assim como valores positivos de FB indicam sobrepredições e negativos subpredições. O modelo superestimou as concentrações mais altas das estações de Carapina, Enseada do Suá, Vitória-Centro, Vila Velha-Centro e Cariacica e, portanto, na maioria dos casos, as concentrações máximas previstas pelo CALPUFF são maiores que as concentrações observadas. Entretanto, os valores encontrados para as estações de Laranjeiras, Jardim Camburi e Vila Velha-Ibes para a razão RHC indicam que o modelo superestima as concentrações nestas regiões. Os valores do FAC2 encontrados ficaram aquém do esperado para na maioria das estações. Para a estação de Cariacica o FAC2 se aproxima de 0.20, enquanto as estações de Vila Velha- Centro e Enseada do Suá com 0.52 e 0.99 superam as expectativas e Enseada do Suá quase atinge o desempenho ótimo de 1.00. Os resultados também foram avaliados para a média de 24h e a média mensal para todas as estações de monitoramento. Por fim, notou-se a melhora do desempenho do modelo com aumento do tempo de média, indicando a dificuldade da modelagem em acompanhar variações horárias nessa aplicação.

Moraes (2004) em sua tese apresenta uma ferramenta para a previsão do campo de vento e concentração de poluentes na micro-escala atmosférica. Para a obtenção deste objetivo, modelos de última geração para o cálculo do campo de vento e concentração de poluentes na

atmosfera foram unificados através de uma interface totalmente concebida no SINMEC/UFSC. Esta interface foi testada e verificada utilizando dados reais e simulados de vento, apresentando bons resultados. Os modelos utilizados foram o *Advanced Regional Prediction System* (ARPS), *California Meteorological Model* (CALMET) e o *California Puff Model* (CALPUFF). Os resultados das simulações com os modelos ARPS e CALMET foram avaliados utilizando índices estatísticos, e apresentaram valores comparáveis aos encontrados na literatura. Os resultados obtidos para as concentrações de poluentes, como modelo CALPUFF, foram por sua vez, comparados com dados reais de concentração de poluentes, medidos nos arredores do complexo termoelétrico Presidente Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo (SC). Os resultados obtidos para concentração do poluente SO2 ficaram em torno de 30 a 60 % dentro de um fator de 2 (FAC2), que por sua vez, estão dentro intervalo esperado.

Com base nesta revisão, pode-se afirmar que os sistemas de modelos para a qualidade do ar são, hoje em dia, as ferramentas mais modernas disponíveis para estudos, previsões e monitoramento da qualidade do ar.

4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Os modelos de dispersão atmosférica representam uma descrição matemática simplificada dos processos de transporte e de difusão turbulenta dos poluentes na atmosfera. Estes modelos têm como base a solução das equações fundamentais de transporte, que não apresentam solução analítica, de forma que são necessários métodos numéricos, aplicados às condições iniciais e de contorno apropriadas para a obtenção de uma solução (MELO, 2011).

Estes modelos variam em grau de complexidade e podem ser classificados pela concepção matemática em duas principais classes, os eulerianos e lagrangeanos. Os modelos eulerianos utilizam soluções da equação difusão-advecção (uma aproximação da equação de conservação da massa), em um sistema de referência fixo em relação à terra (SOARES, 2010). Esses modelos em geral requerem um custo computacional muito elevado devido à complexidade de suas equações (VICENTINI, 2011).

Na metodologia lagrangeana, formula-se um modelo de trajetórias para o movimento das partículas do fluido. O elemento ou partícula de um fluido é um pequeno volume de controle que viaja com a velocidade local do meio fluido, de modo que a solução do escoamento turbulento que transporta estas partículas deve ser conhecida. Para isso, é necessário conhecer a densidade de probabilidade da distribuição de concentração do poluente (MORAES, 2004).

Em resumo, abordagem euleriana utiliza-se da solução de uma equação diferencial de conservação da massa para determinar a concentração média da espécie em um ponto no espaço, considerando o referencial fixo em relação à terra. Para isso utiliza-se de métodos numéricos (diferenças finitas, volume finitos, etc.), dando as devidas condições iniciais e de contorno. Já na abordagem lagrangeana, o fenômeno é descrito a partir de uma formulação integral utiliza-se de um referencial móvel, que se desloca com a pluma de poluentes. Pode-se assim dizer que a concepção lagrangeana é uma técnica alternativa para obter as concentrações médias sem precisar resolver a equação de difusão-advecção, proporcionando assim ganho computacional nas modelagens (VICENTINI, 2011).

Ainda existem os modelos gaussianos, que podem ser considerados como uma subclasse dos dois anteriores (LONGHETTO, 1980 apud MORAES, 2001). Os modelos clássicos guassianos foram obtidos pela simplificação da equação de transporte de massa, considerando à homogeneidade da turbulência e do vento. Devidos a dificuldade de encontrar estas condições na CLP, esses modelos ficam limitados a aplicações de *near field*, conhecidos

também como *Short Range Transport* – SRT, onde as fontes emissoras se encontram em distâncias menores que 50 km dos receptores (SOARES, 2010).

Contudo, devido à sua simples concepção e sua fácil implementação numérica, os modelos de pluma Gaussiana são largamente utilizados na predição de concentrações de contaminantes na camada limite atmosférica (CLA), principalmente no cálculo das máximas concentrações ao nível do solo (ARYA, 1999 apud VICENTINI, 2011).

Porém para simulações em que o transporte de poluentes percorre longas distâncias (*Long Range Transport* – LRT ou *far-field*), acima dos 50 km, a EPA recomenda modelos baseados na concepção gaussiana do tipo *puff* (EPA. 2005A), que são aperfeiçoamentos destes últimos. Esses modelos já possuem uma aplicabilidade bem maior e são hoje em dia, segundo alguns autores, as ferramentas mais potentes para o estudo do transporte e dispersão de poluentes

Os modelos AERMOD e CALPUFF usados neste estudo se baseiam nas metodologias gaussianas clássica e do tipo *puff*, respectivamente.

4.1. AERMOD

O AERMOD é um modelo de dispersão Gaussiano, ou seja, a pluma dispersa na direção vertical e horizontal em regime permanente, sendo que a distribuição em grandes distâncias se altera por efeito da turbulência na camada da superfície da Terra (HOLMES e MORAWASKA, 2006). Neste modelo o sistema de coordenadas é fixo e as propriedades do fluido como densidade, temperatura e velocidades do vento são calculadas em um ponto do espaço fixo, com coordenadas nos eixos x, y e z, no tempo t desejado. (SILVA e SARNAGLIA, 2011).

No presente capitulo será descrito como o modelo AERMOD calcula a concentração nos receptores a partir dos parâmetros de entrada necessários para a modelagem. Esses parâmetros podem ser características da fonte, como tipo de fonte geradora, vazão, a concentração do poluente e a taxa de emissão, além de características da região, como direção e velocidade do vento (MOTA, 2000). As características anteriormente citadas sofrem influência direta das características atmosféricas e geofísicas, como albedo e rugosidade do solo (CIMORELLI *et al*., 2004).

O programa utilizado no presente estudo é composto por um programa principal (AERMOD) e dois pré-processadores (AERMET e AERMAP). Nos subcapítulos abaixo será descrito

como ocorre a avaliação das informações meteorológicas disponíveis para posterior organização pelo AERMET e como as características do terreno, bem como dos pontos receptores são agrupados pelo AERMAP.

Assim, alterando as configurações desejadas nos pré-processadores e no próprio programa é possível considerar alguns outros processos, a fim de tornar a modelagem cada vez mais próxima dos processos que ocorrem na atmosfera. Dentre eles podemos citar:

- Deposição seca: Utilizada para o cálculo das taxas de deposição dos gases e de material particulado.

- Deposição úmida: Função disponível para calcular a remoção dos poluentes por meio de processos úmidos, como nuvens e chuva. Seu calculo é baseado no coeficiente horário.

- *Plume rise*: Utiliza as relações de Briggs (1975), definidas em função do empuxo e da quantidade de movimento, para calcular a elevação da pluma durante condições neutras e instáveis.

- Efeito de cisalhamento do vento: Este processo é considerado no *default* do modelo.

- Terreno complexo: Segundo Sheppard (1956), para considerar uma topografia complexa da região de estudo pode-se utilizar o conceito de divisão de linha de corrente, que consiste no escoamento e a dispersão de poluentes atmosféricos em terrenos complexos se desenvolverem em duas camadas, sendo que na camada inferior o escoamento permanece na horizontal enquanto na camada superir o escoamento tende a ascender sobre o terreno.

- *Building downwash*: Que modela a efeito exercido pelos obstáculos sobre a pluma a partir do modelo *Plume Rise Model Enhancements* (PRIME). Segundo MELO (2011), o processo calcula os seguintes parâmetros:

    - Campos de intensidade turbulenta;
    - Velocidade do vento;
    - Inclinação das linhas de corrente média.

Como os valores acima explicitados decaem gradualmente após o obstáculo, o modelo PRIME determina a mudança na posição da linha central da pluma e o espalhamento da mesma.

- Tratamento de fontes-área e fontes-volume: Algumas fontes linhas, como vias de tráfego podem ser tratadas como fontes-áreas alongadas ou fontes-volume encadeadas umas às outras (JUNGERS *et al.*, 2006).

4.1.1. Formulação Matemática

Um dos principais avanços dos cálculos de dispersão do AERMOD em relação aos outros modelos regulatórios existentes é a representação da dispersão da pluma na camada limite convectiva, que ocorre pela consideração de transporte de poluente nas porções superior e inferior da pluma, como é apresentado pela Figura 3 abaixo (EPA, 2004a).

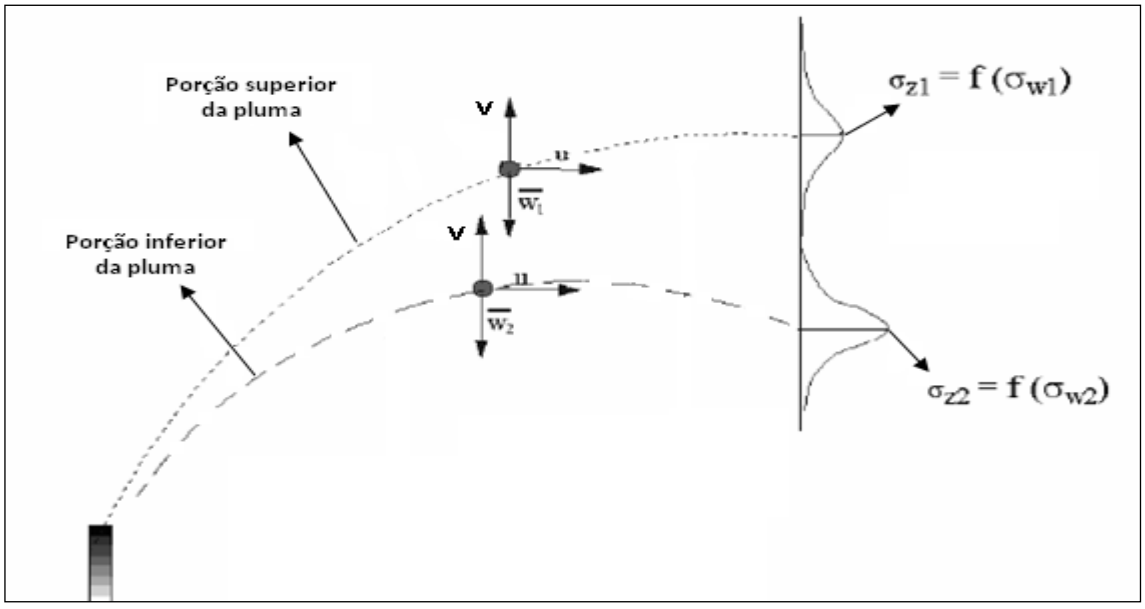


FIGURA 3 - Aproximação da distribuição da pluma na camada limite convectiva

Fonte: Adaptado de EPA, 2004a.

Para isso, o modelo adota que horizontalmente a pluma se dispersa de maneira gaussiana, enquanto que verticalmente, além da dispersão da pluma gaussiana vertical, considera também uma pluma indireta e uma pluma penetrada. A fonte indireta consiste na consideração da parte da pluma que primeiro atinge a altura da camada limite convectiva, e a pluma penetrada é a consideração da contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva (CLC) (BARBON, 2008), como pode ser observada na Figura 4.

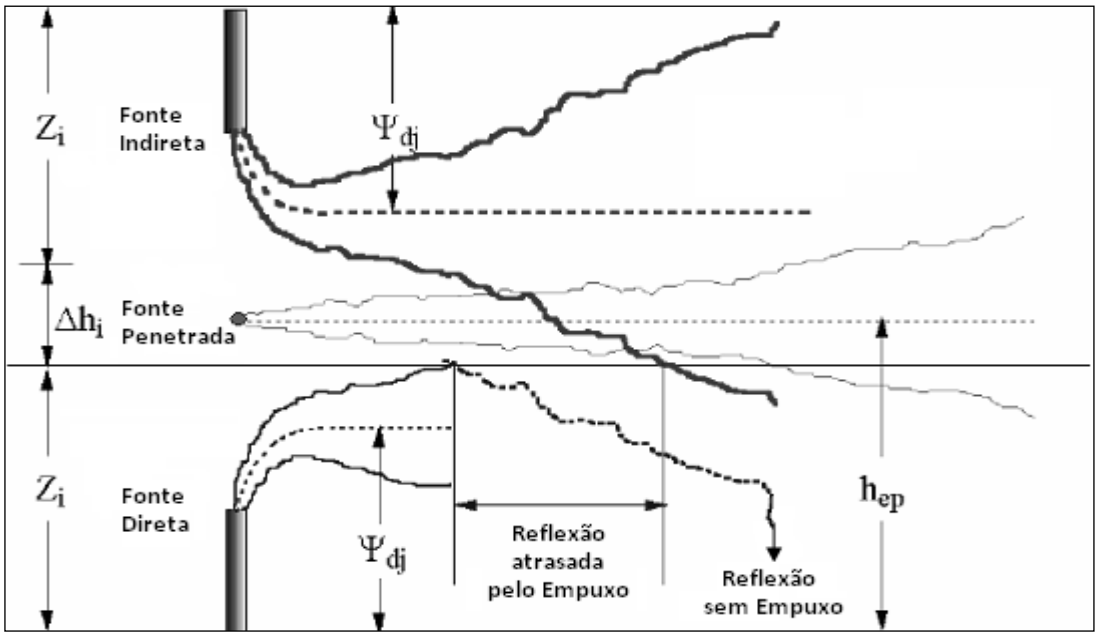


FIGURA 4 - Tratamento da Pluma na Camada Limite Convectiva pelo modelo AERMOD.
Fonte: Adaptado de EPA, 2004a.

O modelo descrito na presente seção pode ser derivado da equação de advecção-difusão em situações idealizadas, porém, como característica do modelo, é considerado que a velocidade do vento é constante, o regime estacionário e a turbulência homogênea. Assim, a contribuição da fonte direta pode ser descrita pela equação abaixo, apresentada pela (EPA, 2004a).

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

Sendo que:

$C_d(x,y,z)$: Concentração devido a fonte direta

Q: Vazão mássica de emissão pela chaminé

$\overline{w}_j$: Velocidade média vertical da porção da pluma

h_s: Altura efetiva da chaminé corrigida para o efeito de recirculação que pode ocorrer devido à chaminé (*stack tip downwash*)

h_d: Subida da pluma da fonte direta

f_p: Fração do material emitido pela fonte que permanece na camada limite convectiva ($0 < f_p < 1$)

j: Valor igual à 1 para linha inferior da pluma e igual à 2 para a linha superior da pluma

u: Velocidade do vento

σ_x: Coeficiente de dispersão horizontal

σ_y: Coeficiente de dispersão vertical

x, y, z: Distância segundo as direções dos eixos coordenados

λ : Coeficiente de distribuição

Ψ_{dj}: Altura entre a base da fonte e a linha central da pluma

exp(.): e é a base dos logarítimos naturais.

Já a contribuição das fontes indiretas pode ser descrita como a equação abaixo, também apresentada pela (EPA, 2004a).

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

Em que h_i é a parte da pluma que ascende além do topo da camada limite convectiva.

A contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva pode ser expressa como:

$$C_p(x,y,z) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi u \sigma_{zp}}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[exp\left(-\frac{\left(z - h_{ep} - 2mz_{ieff}\right)^2}{2{\sigma_{zp}}^2} \right) + exp\left(-\frac{\left(z + h_{ep} + 2mz_{ieff}\right)^2}{2{\sigma_{zp}}^2} \right) \right]$$

Sendo,

z_i: Altura acima da superfície refletida em uma camada estável

σ_{zp}: Dispersão vertical total da fonte penetrada

h_{ep}: Altura da pluma que penetra além da camada limite convectiva

As equações acima descritas apresentam a concentração do poluente desejado em um ponto do espaço pré-definido.

O primeiro termo em colchetes da equação 1 representa a parcela da concentração relativa à dispersão vertical. Já o segundo termo em colchetes apresenta o acúmulo de poluente proveniente da consideração do efeito do contorno sólido ou contorno de reflexão, devido ao solo.

4.1.2. Descrição do pré-processador AERMET

O pré-processador de dados meteorológicos do modelo matemático AERMOD é o AERMET. Dentre suas funções, a principal é a organizações de dados meteorológicos para posterior uso no AERMOD.

Para isso, o pré-processador é dividido em três etapas complementares: na primeira ocorre a extração e o processamento dos dados meteorológicos a serem considerados no estudo.

Na segunda etapa ocorre o agrupamento dos dados em períodos de 24 horas e gera com eles um único arquivo, e na última etapa de processamento o programa lê o arquivo gerado pelo estágio anterior e estima os parâmetros de camada limite, que são necessários como dados de entrada do AERMOD (EPA, 2004b). O AERMOD utiliza esses valores para gerar um perfil de variáveis meteorológicas, necessário na simulação da dispersão dos poluentes.

Esses passos são explicados pela Figura 5:

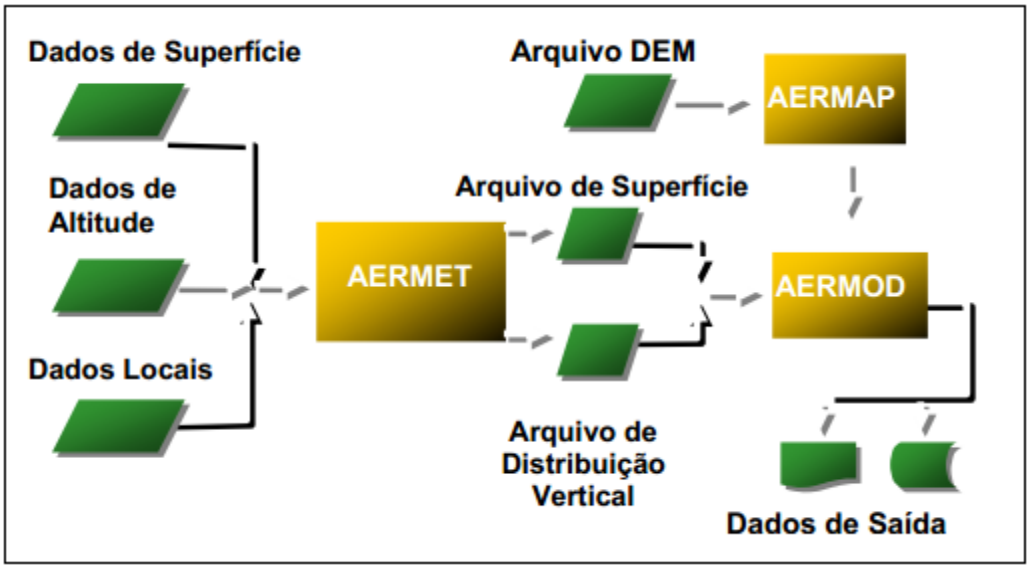


FIGURA 5 - Atividades das três etapas do pré-processador AERMET
Fonte: FERREIRA, 2005.

4.1.3. Dados de entrada para o AERMET

Também conhecido como *AERMOD Meteorological Preprocessor*, é o responsável pela realização das etapas acima citadas. Para isso é necessário o fornecimento dos dados característicos de superfície, como reflexibilidade (albedo), rugosidade da superfície e informações meteorológicas. Esses parâmetros são utilizados para o cálculo de alguns parâmetros da camada limite, como a velocidade de fricção e o comprimento de Monin-

Obukhov e que, a partir desses dados, o pré-processador pode estimar as escalas de velocidade convectiva e altura da camada de mistura. Esses dados geram dois arquivos de saída, que são utilizados pelo AERMOD. São eles o AERMET.pfl e o AERMET.sfc (EPA, 2004a).

As observações meteorológicas mínimas necessárias para as simulações com o modelo AERMET são basicamente:

1. Dados meteorológicos de superfície.
    i. Observações horárias de:
        a) velocidade do vento
        b) direção do vento
        c) temperatura ambiente ou de bulbo seco
        d) cobertura de nuvens ou cobertura total do céu
        e) pressão na superfície (opcional)
        f) umidade relativa (opcional)
    ii. Dados de precipitação:
        a) taxas de precipitação (opcional)
2. Dados de altitude (ar superior):
    i. Dois perfis verticais diários de:
        a) velocidade do vento
        b) coeficiente de turbulência vertical
        c) temperatura
        d) desvio padrão da direção do vento

Segundo a EPA (2004b), o AERMET pode processar os seguintes formatos: CD144 (*Card Deck 144 Format*), SCRAM (*Suport Center for Regulatory Models*) e SAMSON (*Solar and Meteorologial Surface Observation Network*).

4.1.4. Dados de saída do AERMET

Os dados de saída do AERMET, após as três etapas são os arquivos AERMET.pfl e o AERMET.sfc, sendo que o primeiro apresenta o resultados dos cálculos relativos aos

parâmetros da camada limite, enquanto o segundo contém os dados meteorológicos de superfície. Os parâmetros presentes nos arquivos são:

- Fluxo de Calor na Superfície (H);
- Velocidade de Fricção (u*);
- Comprimento de Monin-Obukhov (L);
- Escala de Temperatura Potencial (θ*);
- Altura da Camada de Mistura (Zi);
- Escala de Velocidade Convectiva (w*).

No AERMOD eles serão utilizados para calcular os perfis verticais de:

- Velocidade do Vento (u);
- Gradiente de Temperatura Potencial ($\partial\theta/\partial z$);
- Temperatura Potencial (θ);
- Turbulência Vertical (σ_w);
- Turbulência Lateral (σ_y).

É importante ressaltar que a relevância dos resultados depende da qualidade dos dados iniciais.

4.1.5. Descrição do pré-processador AERMAP

Para um modelo matemático ser considerado regulatório ele deve seguir uma série de parâmetros, dentre elas o de modelar a concentração em qualquer tipo de terreno, ou seja, de terrenos planos a terrenos complexos, uma vez que essas informações interferem nos resultados obtidos na modelagem em alguns pontos receptores. Para isso o AERMOD utiliza o pré-processador *AERMOD Terrain Preprocessor* (AERMAP), que foi desenvolvido para pré-processar dados de terreno juntamente com a localização dos pontos receptores e das fontes de emissão. Como arquivo de saída gera um dos arquivos de entrada para o AERMOD com uma escala de altura para a posição de cada ponto receptor. Segundo BARBON (2008), em resumo, o AERMAP deve determinar a elevação da base das fontes e dos receptores, para um resultado de modelagem pelo AERMOD mais próximo dos dados de medição.

4.1.6. Dados de entrada para o AERMAP

Para o pré-processamento nesta etapa é necessário fornecer ao programa a localização das fontes receptoras e um arquivo de terreno, no formato *Digital Elevation Model (*DEM) que, segundo THÉ (2006), consiste em uma malha contendo os dados de elevação do terreno de dimensão aproximada de 90 metros por 90 metros na linha do equador, onde serão plotadas as fontes e os receptores. Arquivos nessa extensão são obtidos através da *United States Geological Survey – USGS* (EPA,2004c).

4.1.7. Dados de saída do AERMAP

O arquivo de saído deste pré-processador contém as informações geográficas das fostes e pontos receptores com a altura de base e a escala de altura em um arquivo no formato da forma AERMAP.OUT. Assim, este arquivo contém os locais onde se deseja obter as concentrações dos poluentes requeridos.

4.1.8. Modelagem de fontes no AERMOD

No modelo regulatório AERMOD as emissões podem ser representadas como fonte pontual, área e volumétrica, além de areapoly e areacirc, que serão explicadas nas seções seguintes.

Essa distinção é necessária tendo em vista as variadas formas de emissão apresentadas na região, como chaminés, vias de tráfego, carregamentos, entre outros. Assim, para um resultado mais próximo dos valores medidos é necessária a escolha do tipo de fonte que será considerado para cada emissão. No AERMOD são divididas em quatro tipos distintos:

- Pontuais: Emissões que podem ser consideradas em apenas um ponto, como chaminés.
- Área: Fontes extensas em que pode ser representada por uma área de formato retangular, como área exposta de minas de extração de minério de ferro.
- Volumérica: Fontes de pequena dimensão e cuja altura é importante na emissão, sendo melhor representada em três dimensões, como o empilhamento.
- Areapoly: Fontes extensas em que pode ser representada por um polígono de n vértices, como área exposta de minas de extração de minério de ferro.
- Areacirc: Fontes com as características de fonte área e que possuem um formato próximo ao circular.

4.1.9. Fonte Pontuais

Os parâmetros de descrição das Fontes Pontuais utilizados para modelagem das mesmas foram:

- Identificação;
- Coordenadas UTM (Km);
- Altura do Solo (m);
- Diâmetro (m);
- Velocidade (m/s);
- Temperatura (K);
- Taxa de Emissão (g/s).

Segunda a EPA (2004a), caso o valor do parâmetro temperatura estiver com valor nulo, o modelo ajusta a mesma para cada hora, de acordo com a temperatura ambiente. Ainda, caso o usuário deseje, o AERMOD modela plumas com valor de temperatura de saída superior à temperatura ambiente, porém não modela plumas com temperatura inferior á temperatura ambiente.

4.1.10. Fonte Área

Os parâmetros de descrição das Fontes Área utilizados para modelagem das mesmas foram:

- Identificação;
- Coordenadas UTM (Km);
- Altura do Solo (m);
- Comprimento da Fonte na Direção x (m);
- Comprimento da Fonte na Direção y (m);
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m) (opcional);
- Taxa de Emissão (g/(s-m²)).

Dessa forma a fonte é considerada retangular e as dimensões das arestas são calculadas a partir das coordenadas e dos comprimentos nas direções x e y, necessárias no arquivo de entrada.

Em fontes de área passíveis, como erosão do vento ou evaporação não é necessário o parâmetro de altura vertical máxima (EPA, 2004a).

4.1.11. Fonte Volumétrica

Os parâmetros de descrição das Fontes Volumétricas utilizados para modelagem das mesmas foram:

- Identificação;
- Coordenadas UTM (Km);
- Altura do Solo (m);
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m);
- Dimensão Lateral Inicial da Pluma (m);
- Taxa de Emissão (g/s).

4.1.12. Fonte Areapoly

Os parâmetros de descrição das Fontes Areapoly utilizados para modelagem das mesmas foram:

- Identificação;
- Coordenadas UTM (Km);
- Número de vértices (opcional);
- Altura do Solo (m);
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m) (opcional);
- Taxa de Emissão (g/(s-m²)).

Neste tipo de fonte é necessária a declaração de todos os vértices em ordem horária ou anti-horária. Assim como na Fonte Área, em fontes de área passíveis, como erosão do vento ou evaporação não é necessário o parâmetro de altura vertical máxima (EPA, 2004a).

4.1.13. Fonte Areacirc

Os parâmetros de descrição das Fontes Areapoly utilizados para modelagem das mesmas foram:

- Identificação;
- Coordenadas UTM (Km);

- Número de vértices (opcional);
- Altura do Solo (m);
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m) (opcional);
- Número de vértices (opcional);
- Taxa de Emissão (g/(s-m²)).

Esse tipo de fonte modela a emissão proveniente de polígonos com forma próxima da circular, sendo que o modelo gera automaticamente um polígono regular de até 20 lados, porém o usuário pode definir esse parâmetro através do parâmetro Número de Vértices (EPA, 2004a).

4.2. CALPUFF

O *California Puff Model* (CALPUFF) é um modelo Lagrangeano não estacionário do tipo *puff* para a simulação da dispersão de poluentes e que pode ser utilizado para uma grande variedade de aplicações nos estudos de modelagem de qualidade do ar. O modelo foi proposto por Scire *et al.* (1990) e revisado por Scire *et al.* (2000) e foi adotado recentemente pela *United States Environmental Protection Agency* (US-EPA) como modelo regulatório para estudos de impacto ambiental que abrangem distâncias de 50 a 300 km e que incluam topografia e sistemas meteorológicos complexos.

O sistema CALMET/CALPUFF é integrado por três componentes principais: o CALMET (*California Meteorological Model*), um modelo meteorológico tridimensional, o CALPUFF, o modelo de dispersão em si, e o CALPOST, um pacote de pós-processamento que permite computar as aas concentrações e fluxos de deposição médios previstos. (SCIRE *et al*., 2000b). O software sistema CALPUFF é inteiramente público, incluindo seus manuais e códigos fontes, podendo ser obtido na internet no seguinte endereço http://www.src.com/CALPUFF/CALPUFF1.htm.

Cada um desses programas possui uma interface gráfica própria que auxilia na preparação dos arquivos de controle, escritos em linguagem FORTRAN, para a execução do programa (MELO, 2011).

4.2.1. Formulação matemática do modelo

Modelos do tipo *puff* representam, a pluma é representada por uma série de pacotes discretos (*puffs*) de material poluente. A Figura 6 mostra a representação de uma pluma por uma série de puffs.

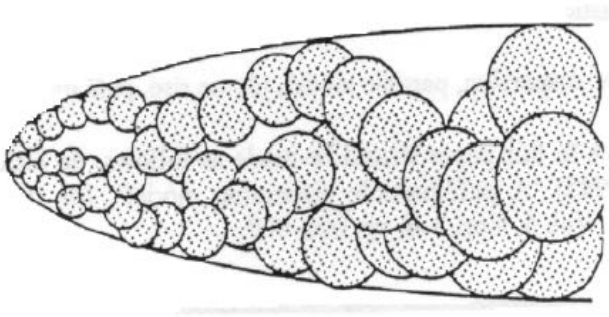


Figura 6 - Representação de uma pluma pela aproximação do tipo *puff*.
Fonte: Adaptado de HAANA (1995) apud MORAES (2004).

Cada *puff* tem uma determinada massa que é distribuída inicialmente de maneira uniforme ou Gaussiana (a mais utilizada). O *puff* é transportado de acordo com a trajetória de seu centro de massa, que é determinada pelo vetor velocidade do vento local, enquanto se expande de maneira Gaussiana, segundo os coeficientes de dispersão. Estes coeficientes são dependentes do tempo, sendo os responsáveis pelo crescimento de cada *puff* (VICENTINI, 2011).

A Figura 7 mostra a evolução de um *puff* emitido por uma fonte pontual (chaminé).

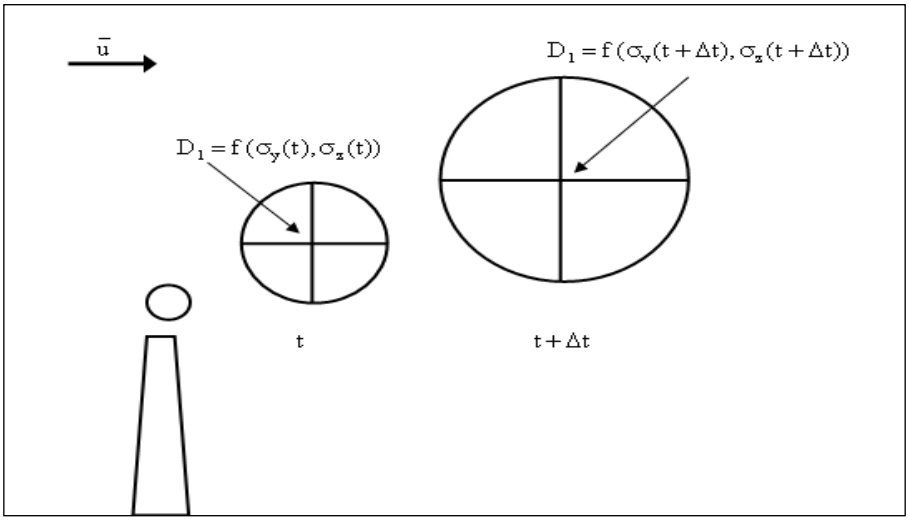


FIGURA 7 - Transporte do *puff* em diferentes instantes de tempo.
Fonte: Adaptado MORAES, 2004 apud MELO, 2011.

O diâmetro D_1 é função dos parâmetros σ_y e σ_z no instante *t*. No instante posterior, $t + \Delta t$, o *puff* se expandiu até o diâmetro D_2, no qual é função dos parâmetros σ_y e σ_z no instante $t + \Delta t$. À medida que o *puff* é transportado na atmosfera, a concentração do material poluente diminui no seu interior (MELO, 2011).

A equação básica para determinar a contribuição de um *puff* em um receptor é dada por:

$$C = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g_v \, exp\left[\frac{-d_a^2}{(2\sigma_x^2)}\right].exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

sendo

$$g_v = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} exp\left[-(H_e + 2nz_i)^2 / (2\sigma_z)\right]$$

Onde C é a concentração ao nível da superfície no receptor, Q_p é a massa de poluente no *puff*, σ_x, σ_y e σ_z são os parâmetros de dispersão na direção alinhada (direção x), perpendicular (direção y) e vertical (direção z) em relação ao vento, respectivamente, d_a, d_c são as distâncias do centro do *puff* ao receptor nas direções alinhada, perpendicular em relação ao vento, H_e é a altura efetiva do *puff* acima do solo, z_i é a altura de mistura e g_v é o termo vertical da equação gaussiana (SCIRE *et al.*, 2000a).

Esta equação é frequentemente expandida para incorporar os termos de reflexão (reflexão da pluma no solo) e deposição/decaimento (precipitação dos poluentes e transformação química). Se integrarmos a equação considerando condições de transporte homogêneo e estacionário teremos a equação da pluma gaussiana clássica, adotada pelo modelo AERMOD (BRAUER, 2004).

O total de concentração em um receptor é a soma das médias das contribuições de todos os *puff* próximos para todo intervalo de amostragem dentro de um passo de tempo:

$$C(x,y,x,t) = \sum_{puff=1}^{total\ de\ puffs} C_{puff}(x,y,x,t)$$

Modelos *puff* geralmente avaliam a contribuição de um *puff* para a concentração em um receptor pelo método *snapshot, que seria* uma aproximação do tipo "foto". Nessa aproximação cada pacote é "congelado" em intervalos de tempo determinados (intervalos de amostragem). A concentração devida aquele *puff* naquele tempo é calculada (ou amostrada). O *puff* é então movido, evoluindo em tamanho e intensidade até o próximo intervalo de amostragem (VICENTINI, 2011).

Uma desvantagem da abordagem tradicional de *puff* é a necessidade da liberação de muitos *puffs* para representar adequadamente uma estreita pluma contínua de a uma fonte. Se o *puff*

não se sobrepõe suficientemente, as concentrações de receptores localizados nos espaços entre os *puffs* no momento da "foto" são subestimados, enquanto que nos centros de *puff* são superestimados.

Ludwig *et al*. (1977 apud MELO, 2011) mostraram que se a distância entre os *puff* exceder um máximo de $2\sigma_y$ resultados imprecisos podem ser obtidos. Para obter melhores resultados a separação do *puff* deve ser reduzida para não mais do que um σ_y.

4.2.2. Modelo meteorológico

Os modelos meteorológicos utilizados em estudos de dispersão podem ser classificados como diagnósticos ou prognósticos, de acordo com a sua formulação. Os modelos prognósticos baseiam-se na solução no espaço e no tempo das equações hidrodinâmicas e termodinâmicas, modificadas para aplicação à atmosfera, para fornecer os campos meteorológicos futuros. Utilizam métodos numéricos sofisticados e parametrizações físicas. Os modelos diagnósticos utilizam dados medidos em estações meteorológicas ou resultados simulados de outros modelos para produzir os parâmetros atmosféricos, necessários aos modelos de dispersão. Em geral são utilizados procedimentos do tipo análise objetiva, onde as informações meteorológicas disponíveis são extrapoladas para todo o domínio (CORREA, 2008).

Assim o CALMET é classificado como um modelo meteorológico diagnóstico que incorpora observações meteorológicas e/ou saídas de modelos meteorológicos prognósticos, para produzir através de técnicas de análise objetiva, campos de velocidade, temperatura e outras variáveis necessárias para as simulações com o modelo CALPUFF.

O modelo meteorológico CALMET é composto por dois módulos principais: o diagnóstico do campo de vento e o micrometeorológico. O primeiro módulo computam os efeitos cinemáticos e de bloqueio do terreno, e o escoamento em encostas para gerar o campo de ventos em uma malha tridimensional. Também possui um procedimento de minimização da divergência do campo de velocidades. O módulo micrometeorológico é responsável pelo cálculo de parâmetros de camada limite sobre o continente e sobre o oceano, tais como classes de estabilidade, velocidade de fricção, comprimento de Monin-Obukhov, altura da camada de mistura, fluxo de calor sensível, entre outros (CORREA, 2008).

Correa (2008) ainda ressalta que os resultados fornecidos por estes modelos dependem fortemente, entre outras coisas, da densidade das observações ou da resolução da malha para representar com precisão o escoamento.

As informações necessárias para a inicialização do CALMET são compostas por dados meteorológicos horários em superfície, dois perfis diários de dados de altitude e dados geofísicos, compostos por elevação do terreno e categorias de uso do solo.

Opcionalmente, também podem ser fornecidos dados observacionais sobre corpos d'água abrangendo a diferença de temperatura entre água e terra, direção e velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa, gradientes de temperatura, acima e abaixo da camada de mistura sobre o corpo d`água, altura da camada de mistura sobre o mar. Esses dados são inseridos no modelo por meio dos arquivos SEAn.DAT.

O CALMET necessita que os dados meteorológicos e geofísicos estejam em formatos específicos antes de serem utilizados. O tratamento destes dados é então realizado com o auxílio dos pré-processadores que preparam os dados para a assimilação no processador CALMET. Na Figura 8 encontra-se um fluxograma do funcionamento dos processadores em relação ao modelo CALMET.

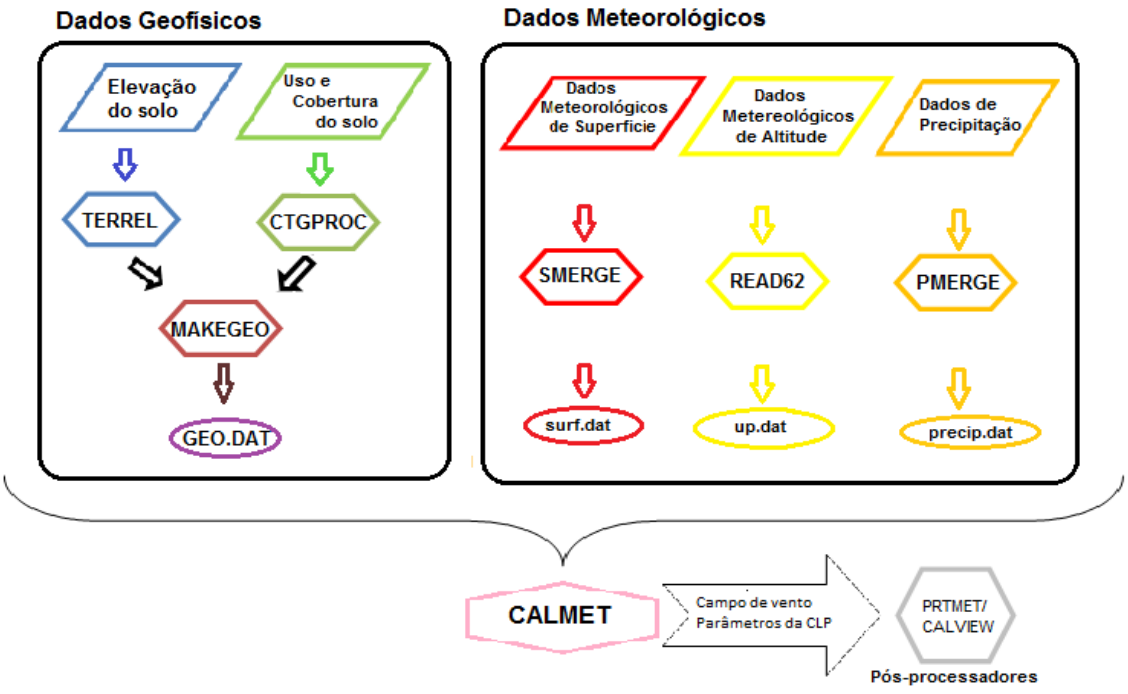


Figura 8 - Fluxograma simplificado dos pré-processadores do Modelo CALMET.
Fonte: Adaptado de SCIRE *et al.* (2000a).

Os pré-processadores são divididos em dois módulos: geofísicos e meteorológicos. São os geofísicos responsáveis pelos dados de terreno e cobertura do solo, e os meteorológicos responsáveis pelas informações meteorológicas contidas nas estações de superfície e de sondagens (DOURADO, 2006).

Existem ainda, associados ao modelo CALMET, diversos outros pacotes de pré e pós-processamento de dados geofísicos e dados meteorológicos, a seguir será descritos apenas os principais:

a) Pré-processadores Geofísicos

• TERREL

O TERREL é responsável pela extração e tratamento de dados de elevação de terreno englobando os formatos do Modelo de Elevação Digital USGS (DEM), dados digitais de terreno ARM3, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) entre outros, com resolução espacial de até 30 metros. Os dados são selecionados a partir das características do domínio escolhidas pelo usuário e organizados em uma grade regular cartesiana ou polar. Os arquivos de resultados gerados após processamento serão lidos pelo pré-processador MAKEGEO.

• CTGPROC

Responsável pela extração e processamento dos dados de uso e cobertura do solo, originalmente, no formato Composite Theme Grid (CTG) e Land Cover (LULC) da USGS, com resolução espacial de até 30 metros para os Estados Unidos e 900 metros para o restante do mundo. Quando os arquivos são muito grandes (~38 MB por quadrante), há a necessidade da compressão deste arquivo, que pode ser feita através do pré-processador CTGCOMP, onde transformará o arquivo no tamanho aproximado de 0,5MB, para então poder ser lido pelo CTGPROC (Dourado, 2006). O programa organiza os dados necessários em uma grade regular baseado nas informações definidas no TERREL. Os arquivos gerados serão utilizados pelo MAKEGEO.

• MAKEGEO

Pré-processador responsável por calcular as categorias de uso do solo e os parâmetros superficiais para cada célula da grade, utilizando os arquivos gerados pelo TERREL e

CTGPROC. O resultado final será o arquivo GEO.DAT, que contém todos os dados geofísicos necessários e no formato correto para ser utilizado pelo CALMET, tais como rugosidade, albedo, razão de Bowen, parâmetro de fluxo de calor no solo, índice de área foliar e fluxo de calor antropogênico. Os arquivos de dados são o de controle do usuário (INP), o DAT gerado pelo Terrel e o DAT gerado pelo CTGPROC.

b) Pré-processadores Meteorológicos

• **SMERGE**

Este pré-processador é o responsável pelo processamento das observações meteorológicas de superfície. O programa extrai os dados de data, hora, velocidade e direção do vento, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão, altura do teto de nuvens, cobertura de nuvens e umidade relativa, que são escritos em um novo formato, compatível com o CALMET, armazenados em um arquivo chamado SURF.DAT. São permitidas até 150 estações meteorológicas, com um arquivo de dados de superfície por estação.

• **PMERGE (Opcional)**

Este pré-processador é o responsável pelo processamento dos dados horários de precipitação, que serão posteriormente usados no CALPUFF para computar a remoção úmida do poluente, caso essa opção tenha sido escolhida pelo usuário no arquivo de controle do CALPUFF. Portanto os dados de precipitação não são obrigatórios. Antes de usar o PMERGE, os dados de precipitação podem ser pré-processados pelo PXTRACT, responsável por extrair os dados do formato NCDC TD-3240 nos períodos de interesse.

• **READ62**

Programa responsável pela extração e processamento de dados de altitude (ar superior) medidos através de radiosondagens. Os dados de altitude processados pelo READ62 são armazenados em um arquivo chamado UP.DAT. Este arquivo contém dados de pressão atmosférica, altura, temperatura, direção e velocidade do vento.

• **CALMM5 (Opcional)**

Este pré-processador prepara os dados prognósticos gerados pelo modelo de mesoescala MM5 para assimilação pelo CALMET. Os parâmetros meteorológicos extraídos pelo CALMM5 são

componentes de velocidade vertical e horizontal, pressão, temperatura, umidade relativa, razões de mistura para vapor, água, chuva, neve e granizo.

c) Pós-processador

PRTMET

Programa responsável pela preparação dos dados contidos no arquivo CALMET.DAT para visualização no módulo Gráfico do CALMET, o CALView, ou através de outros aplicativos gráficos como SURFER. O PRTMET permite que o usuário escolha os parâmetros desejados, em diversos níveis. (CORREA, 2008)

O processador CALMET é responsável pela assimilação de todas as informações geradas pelos pré-processadores. Após sofrer o processo de interpolação e a ação das parametrizações, os dados são organizados em um arquivo chamado CALMET.DAT. Este arquivo é binário e contém, em uma grade regular, os parâmetros que serão usados pelo CALPUFF para calcular as concentrações. Exemplos dos parâmetros determinados nesta etapa são: campos de vento em múltiplos níveis, e campos meteorológicos em superfície com classe de estabilidade Pasquill-Gifford-Turner (PGT), comprimento de Monin-Obukhov, velocidade de fricção, altura da mistura, escala de velocidade convectiva e taxa de precipitação.

4.2.3. CALPUFF

O CALPUFF contem módulos para terrenos complexos, transporte sobre oceano, efeitos de interação costeira, *building downwash*, plume rise, deposição seca e úmida, e transformação química simples. Os principais processos, que não foram mencionados na descrição do AERMOD, são resumidamente apresentados a seguir:

Transformação química: o modelo CALPUFF possui quatro opções internas para a parametrização dos efeitos de transformação química. A primeira baseada no esquema do modelo MESOPUFF II para SO2, SO4, NOx, HNO3 e NO3, a segunda baseada no esquema RIVAD/ARM3 para SO2, SO4, NO, NO2,HNO3 e NO3, a terceira onde o usuário especifica as taxas de transformação, para um ciclo de 24 horas e a última opção permite que o usuário "desligue" o modelo de transformação química.

Efeitos de cisalhamento do vento: algoritmo opcional para a divisão de *puffs* em dois ou mais *puffs*, o que permite levar em conta o efeito do cisalhamento vertical do vento sobre o

mesmo. Taxas de dispersão e transporte diferentes ocorrem nos *puffs* originados de um *puff* primário, o que sob algumas condições podem aumentar substancialmente a taxa de crescimento horizontal da pluma.

Dispersão costeira e sobre a água: módulo específico para computar a influência dos corpos d'água sobre a camada limite atmosférica, permitindo considerar seu efeito no transporte da pluma, dispersão e deposição.

Building downwash: os efeitos exercidos pelos obstáculos (turbulência mecânica induzida) sobre a pluma são considerados por este módulo

Coeficientes de Dispersão*:* várias opções são fornecidas para os coeficientes de dispersão, incluindo o uso de valores medidos, ou baseados na Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, em Pasquill-Gifford, McElroy-Pooler ou ainda nas equações do CTDM (*Complex Terrain Dispersion Model*).

Outras opções: opções para (a) tratamento de fontes área e fontes linha; (b) modelagem de períodos calmos; (c) modelagem de odores; (d) modelagem da visibilidade.

5. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

A área estudada apresenta-se inserida na porção sul do estado do Espírito Santo (Figura 9), delimitada pelas coordenadas no Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) 323500 – 353500 E e 7682000 – 7712000 N (Datum WGS-84).

Como pode-se observar na Figura 9, a região de estudo abrange extensões em dois municípios sendo estes: Guarapari e Anchieta. Do primeiro município, Guarapari, abrange pouco mais de 60Km², correspondendo a cerca de 15,5% do total do quadrante estudado enquanto Anchieta apresenta a maior área de contribuição, correspondendo a 156km² abrangendo mais de 40% do total da área em estudo.

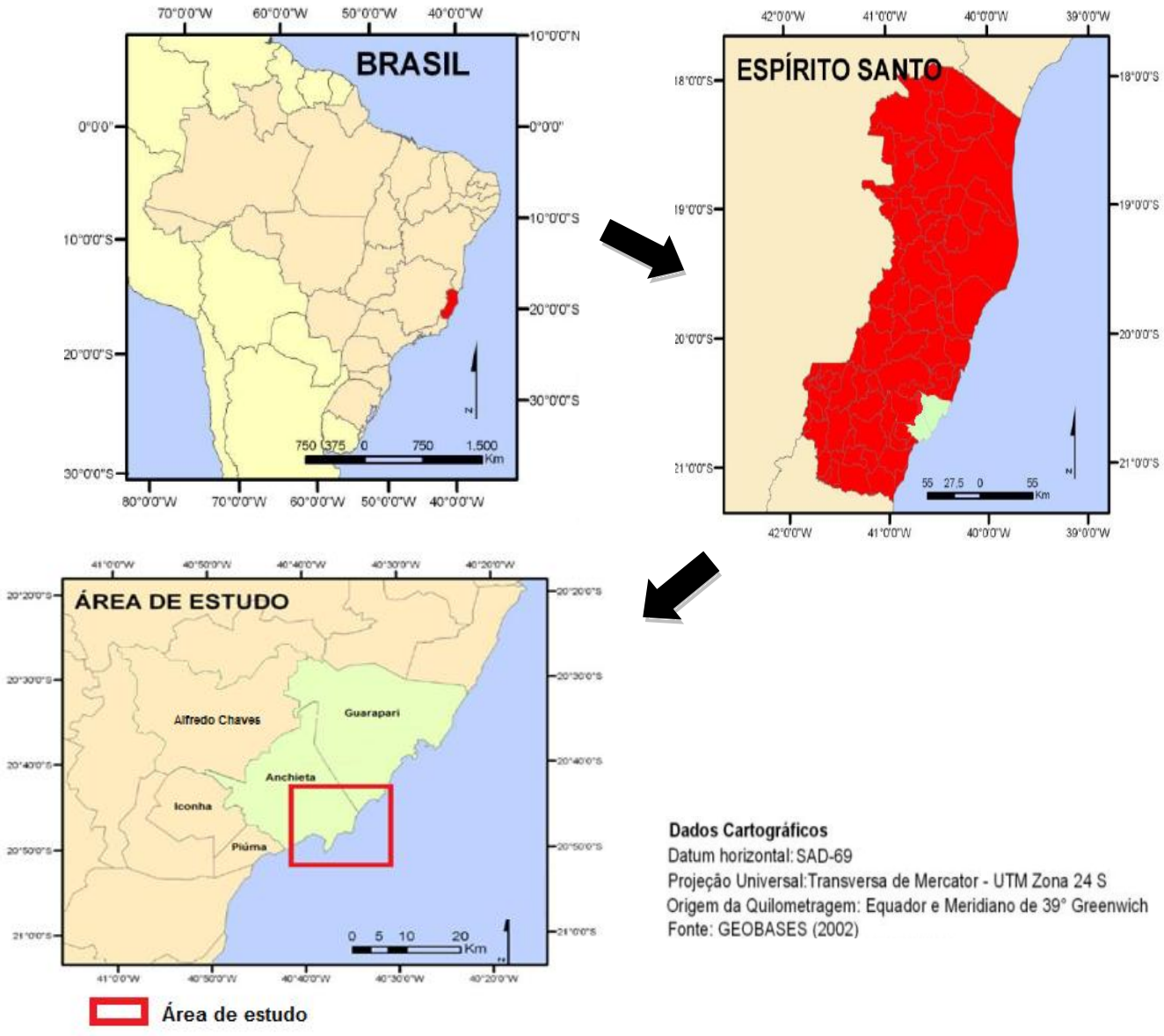


FIGURA 9 - DADOS CARTOGRÁFICOS DA ÁREA DE ESTUDO.
Fonte: Adaptado de BURGOS, 2009.

Como o inventário de fontes industriais usado para a modelagem deste estudo está restrito ao município de Anchieta e como mais de 70% da área terrestre do domínio computacional pertence a este município, optou-se por apresentar neste capítulo apenas as características de Anchieta. São também detalhadas as condições meteorológicas no período para o qual foram feitas as simulações do AERMOD e CALPUFF. Conclui-se com uma breve caracterização da qualidade do ar na região, destacando-se alguns resultados do monitoramento ambiental observados em 2010, ano de referência neste trabalho.

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

O Município de Anchieta está localizado no sul do Espírito Santo (Latitude 20° 48' 14"" S e longitude 40º39'13"" W.), a cerca de 62,4 quilômetros da capital Vitória, ocupando uma área de 404,8 quilômetros quadrados, apresentando altitude média de 2 metros (IJSN, 2008). Faz divisa com os municípios de Guarapari e Alfredo Chaves ao norte, Piúma ao sul, ao leste, o município é banhado pelo Oceano Atlântico e, ao oeste faz divisa com os municípios de Iconha e Alfredo Chaves.

5.1.1. Características Topográficas

No geral, pode-se dizer que a região de estudo possui topografia suave, caracterizada por baixo relevo, e com grandes áreas de pecuária, como pode ser observado na Figura 10. O cume mais alto na região é o Monte de Urubu que é considerado pelo Plano Diretor Municipal de Anchieta como área prioritária para conservação. Tais características são completamente diferentes da Região da Grande Vitória (RGV), tanto do ponto de vista topográfico, como de ocupação do solo, o que a torna única no Estado do Espírito Santo, do ponto de vista de dispersão de poluentes atmosféricos.

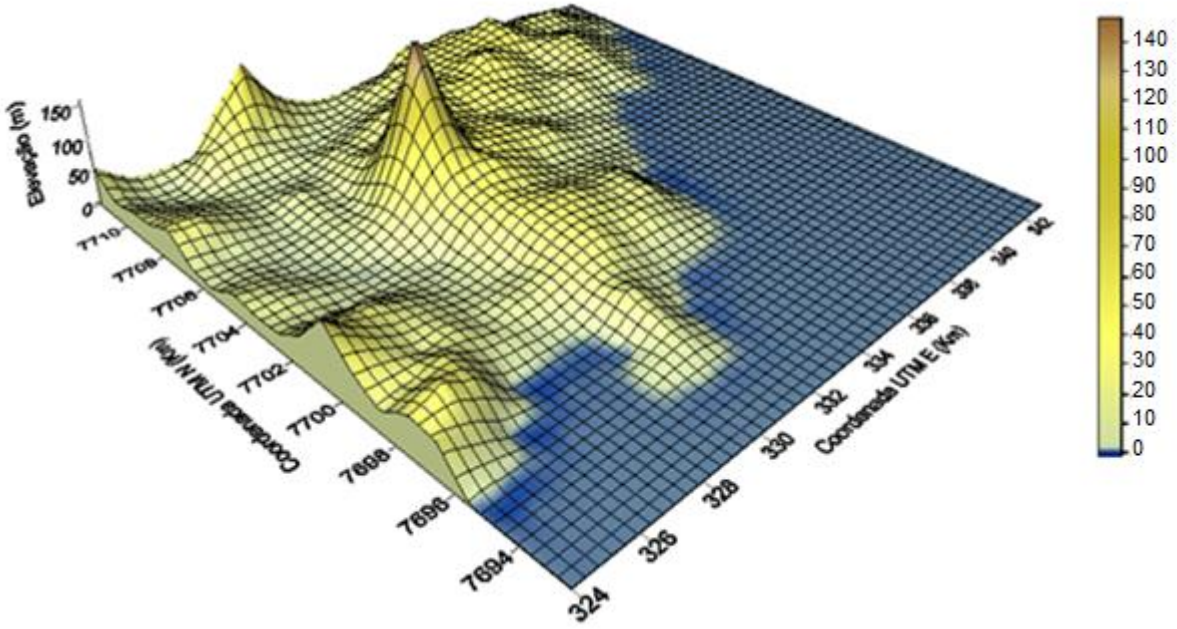


FIGURA 10 - TOPOGRAFIA DA REGIÃO DE ESTUDO.

5.1.2. Condições Meteorológicas para o ano de 2010

Ao falar-se de poluição atmosférica é de grande importância referir-se às condições meteorológicas, já que existe uma correlação importante entre estas e a poluição. Mesmo mantidas as emissões, a qualidade do ar pode mudar em função dessas condições, uma vez que é a interação entre as fontes de poluição e atmosfera a responsável pela definição do nível de qualidade do ar (IEMA, 2007).

A região em questão localiza-se na zona climática Tropical que se caracteriza por possuir duas estações bem definidas: seca e chuvosa (BURGOS, 2009). A seguir é exposto um panorama para o ano de 2010 dos principais parâmetros metrológicos monitorados na Estação do Porto que é a única estação meteorológica adotada para este estudo.

Pode-se observar na Figura 11 que no ano de 2010, o índice pluviométrico anual ultrapassou 1500 milímetros, apresentando os maiores taxas de precipitação nos meses de março e novembro e os meses de maior estiagem foram janeiro e agosto. O mês janeiro apresenta valor atípico, pois apesar de ser considerado mês chuvoso na região, não teve precipitação durante esse período.

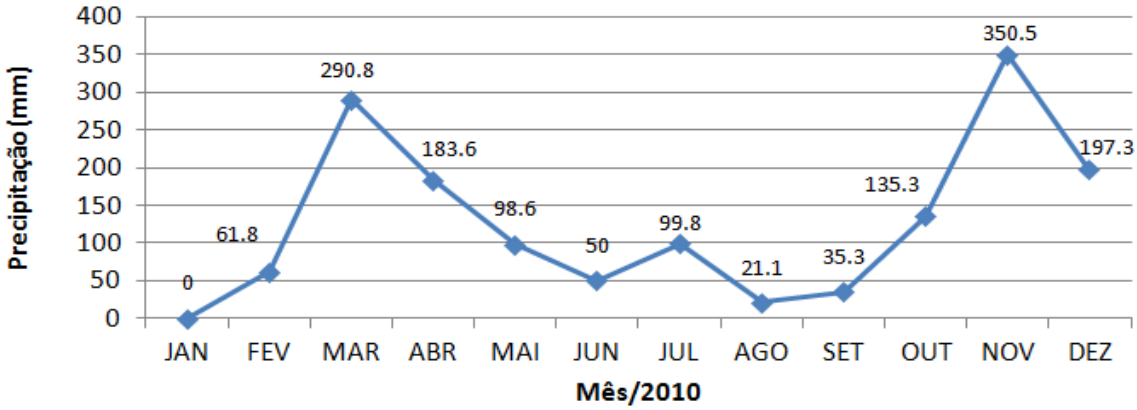


Figura 11 - Precipitação média mensal acumulada.

Fonte: Estação do Porto, 2010.

Dependendo da sua intensidade, as chuvas atuam com muita eficiência na remoção úmida dos poluentes do ar, que quando não considerado na modelagem pode afetar significativamente os resultados das concentrações preditas. Em locais onde o escoamento do ar é obstruído por grandes edificações ou barreiras naturais (serras, montanhas, etc.), a precipitação pluviométrica passa a ser o mecanismo mais importante para a remoção dos poluentes do ar. Nos meses quentes, ela normalmente decorre tanto da intensa convecção que induz à formação de tempestades isoladas. Nos meses frios, as precipitações ocorrem principalmente associadas à penetração de sistemas frontais (VICENTINI, 2011).

Ainda segundo Vicentini (2011), além da remoção dos poluentes capturados pelas gotas que caem, as chuvas promovem a intensificação dos ventos que facilitam a dispersão dos mesmos.

Quanto à temperatura, a Figura 12 apresenta as médias mensais durante o ano de 2010. A temperatura média anual na região foi de 23,8 °C. O mês mais quente foi o de janeiro, enquanto os mais frios foram junho e agosto.

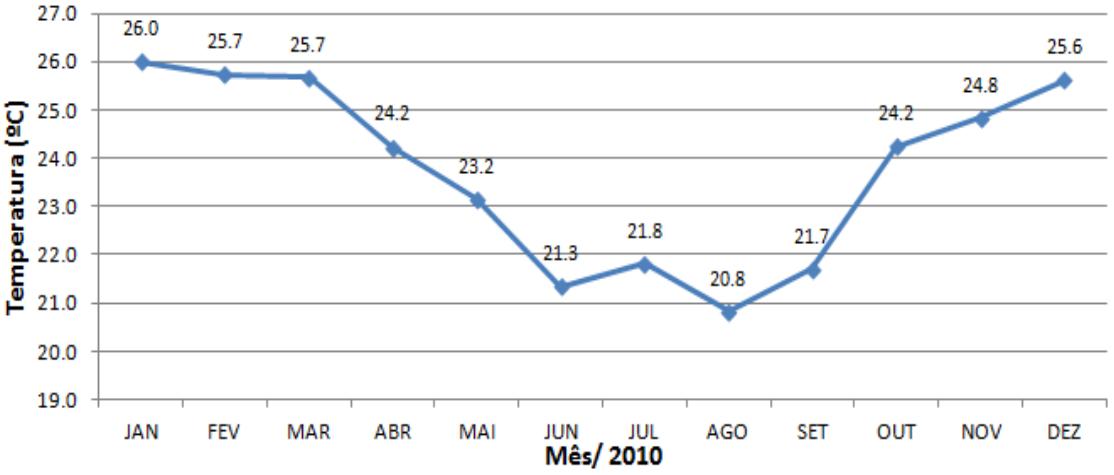


Figura 12 - Temperatura média mensal.
Fonte: Estação do Porto, 2010.

Temperaturas mais elevadas, como as registradas no verão, contribuem para a formação de fortes movimentos verticais ascendentes (convecção), provocando um eficiente arrastamento dos contaminantes do ar localizados nos níveis mais baixos para os mais elevados. Por outro lado, temperaturas mais baixas, como as observadas no inverno, dificultam movimentos verticais, o que permite a manutenção de poluentes atmosféricos nos níveis mais baixos da atmosfera (VINCENTINI, 2011)

A Figura 13 apresenta a média mensal da umidade relativa do ar em 2010. As umidades relativas do ar médias anuais na região foram de 80%, o que caracteriza a região como de clima úmido. O mês mais seco foi o de junho enquanto o mês mais úmido foi o de março.

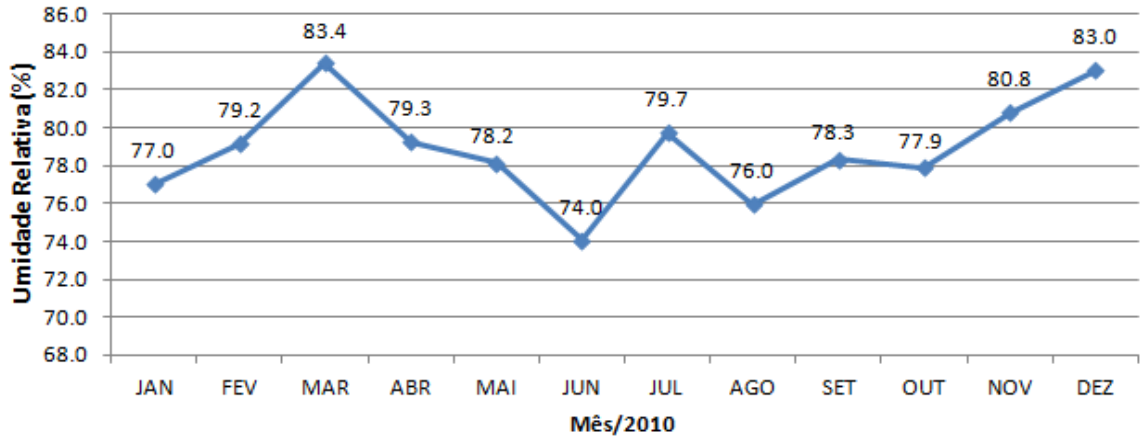


FIGURA 13 - UMIDADE RELATIVA MÉDIA MENSAL.
Fonte: Estação do Porto, 2010.

Quanto à velocidade e direção do vento, pode-se dizer que são de grande importância quando se refere à dispersão de poluentes, por representarem a provável procedência e destino de certos poluentes. De maneira geral, a velocidade do vento é o fator determinante no transporte horizontal dos contaminantes. No transporte vertical, a responsável pelo deslocamento desses poluentes é a turbulência atmosférica (NEDEL, 2003).

Dourado (2006) destaca a importância destes parâmetros para uma estimativa confiável da concentração do poluente na atmosfera. Pequenos erros na estimativa da direção do vento podem causar grandes erros nos cálculos de concentrações. Por exemplo, uma incerteza de 5 a 10 graus na direção do vento que transporta a pluma pode resultar em erros na concentração de 20 a 70% para um determinado ponto, dependendo da estabilidade da atmosfera (VICENTINI, 2011).

Os gráficos das Figuras 14, 15 e 16 mostram a frequência das velocidades e direções dos ventos na região para o ano de 2010.

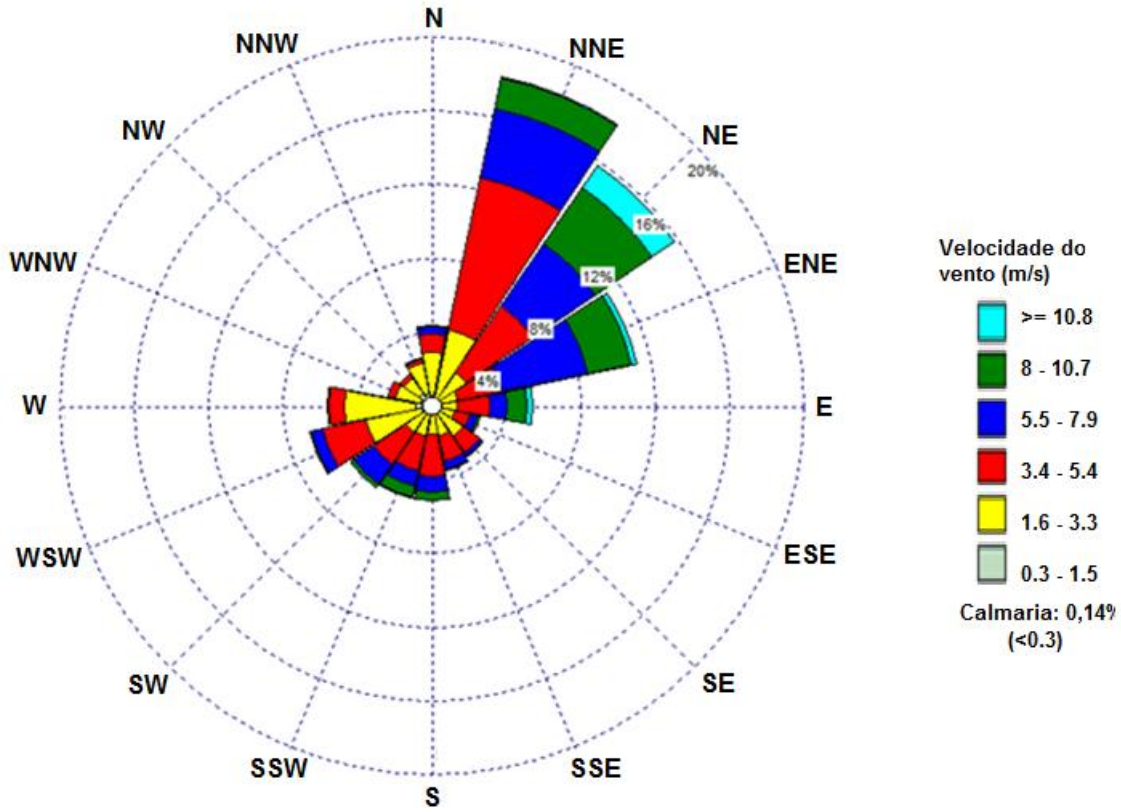


FIGURA 14 – ROSAS DOS VENTOS DA ESTAÇÃO DO PORTO DE 2010.
Fonte: Estação do Porto, 2010.

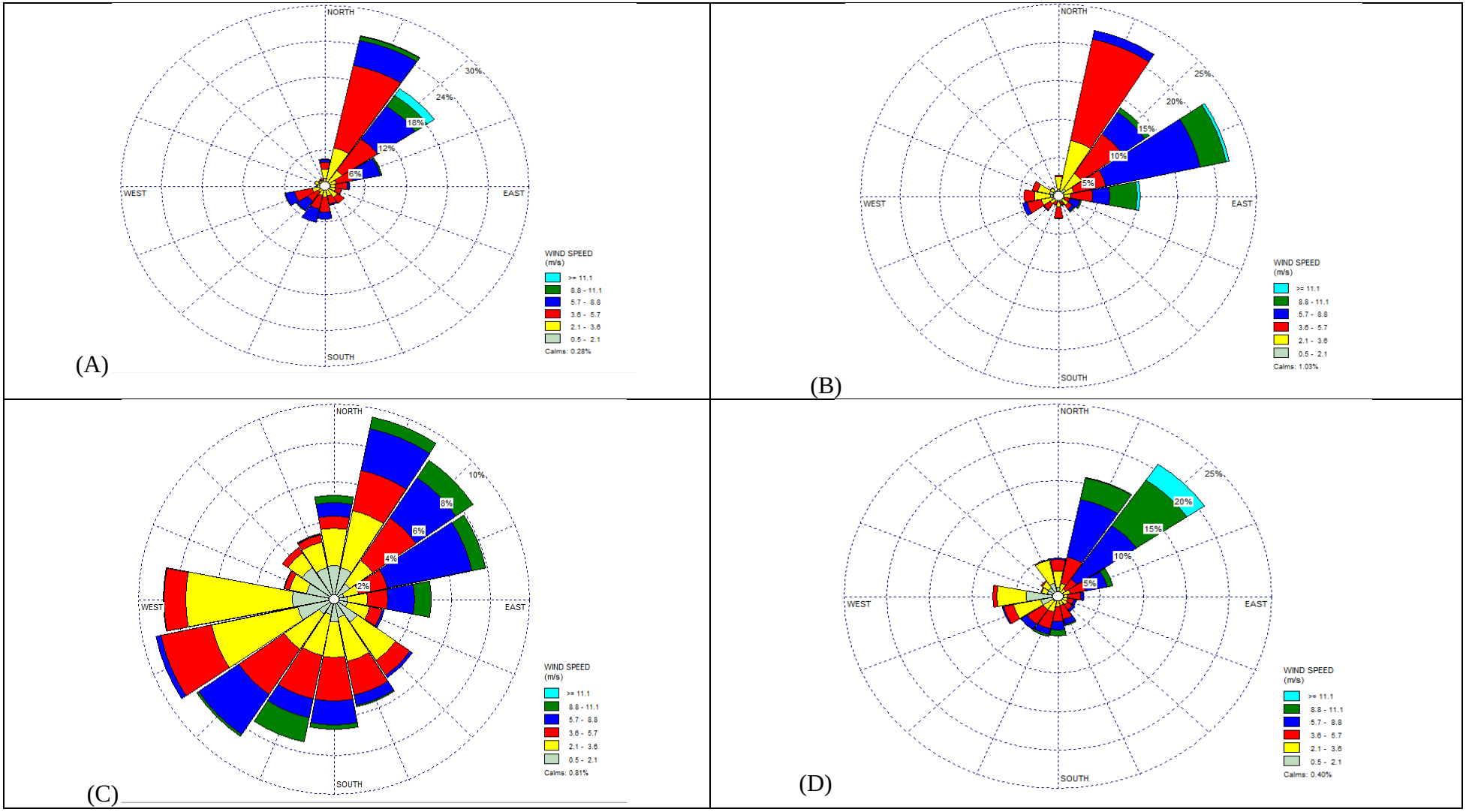


FIGURA 15 – ROSAS DOS VENTOS POR ESTAÇÃO EM 2010: (A) PRIMAVERA; (B) VERÃO; (C) OUTONO E (D) INVERNO

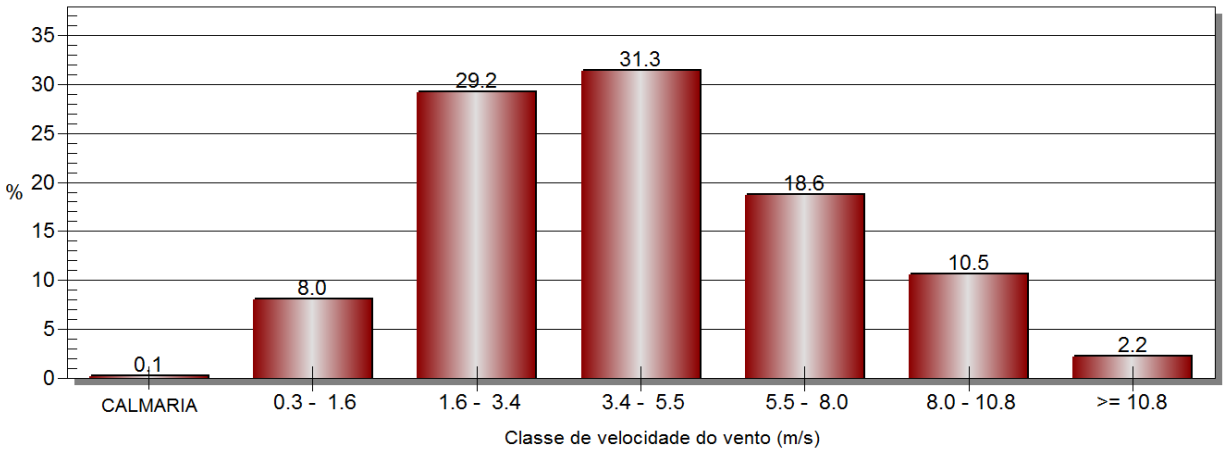


Figura 16 - Distribuição da frequência da classe de ventos.

Fonte: Estação do Porto, 2010.

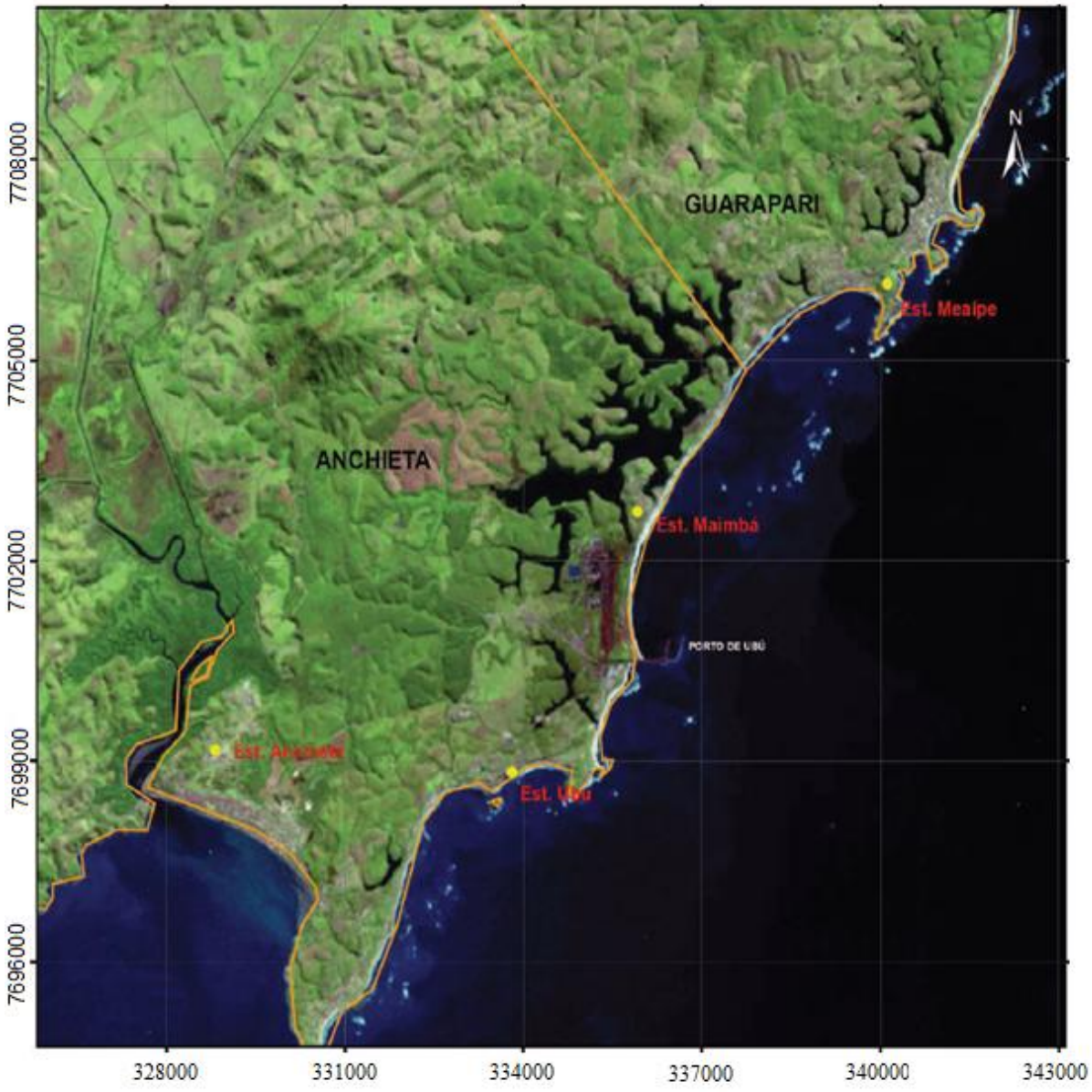
Os gráficos acima foram gerados no software livre WRPLOT View Version 7.0.0 criado pela Lakes Environmental.

Os ventos incidentes na região de estudo possuem direção, predominante, norte-nordeste. Quanto à intensidade, segundo a Escala de Beaufort (Anexo A), os ventos na região de estudo, na maioria do tempo, podem ser classificados como Brisa Leve (1,6-3,3 m/s) até brisa fraca (3,4-5,4 m/s). Situações de calmaria, quando ocorre a estagnação do ar e propicia um aumento na concentração de poluentes na atmosfera, apresentaram uma frequência de apenas 0,14 % durante o ano.

5.1.3. Caracterização da qualidade do ar

A aferição permanente da qualidade do ar, através de estações de monitoramento, é uma das ferramentas adotadas para a gestão dos recursos atmosféricos, cujo objetivo principal é assegurar a saúde e o bem-estar da população no que concerne ao atendimento aos padrões vigentes. Essa atividade deveria ser realizada pela Instituição Pública, por meio de medições efetivas dos diversos poluentes nas regiões industrializadas e nas zonas urbanas. Entretanto, a operação sistemática de uma rede de monitoramento da qualidade do ar é complexa e onerosa, principalmente se o foco das fontes de emissões de poluentes não estão concentrados em uma mesma região. Dessa forma, muitas vezes o monitoramento da qualidade do ar é realizado por empresas privadas, a pedido dos órgãos ambientais, como condicionantes em processos de licenciamento.

Particularmente no município de Anchieta, o monitoramento da qualidade do ar é realizado pela Samarco Mineração em parceria com o órgão ambiental, por meio de estações instaladas nas comunidades de Ubú/Parati, Mãe-bá, Meaípe e Anchieta, conforme mostra a Figura 17.



Dados Cartográficos: Coordenadas UTM SAD 69 MC: -39°W. Escala 1/65.000

Figura 17 - Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar na região.
Fonte: Adaptado RCA/ PCA do Terminal Marítimo de Ubú – Anchieta/ES, 2011
(Mapa elaborado por Marta Oliver, 2009).

O Quadro 3 apresenta os poluentes monitorados em cada uma destas estações.

QUADRO 3 - POLUENTES MONITORADOS EM CADA ESTAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO DE ANCHIETA.

Estação	PTS	PM10	SO2
Anchieta	x		x
Ubú	x	x	x
Mãe-Bá	x	x	x
Meaípe	x		x

A poluição atmosférica por material particulado na região é um assunto, constantemente discutido devido ao grande número de reclamações pela população do entorno. Embora o monitoramento realizado pelas estações de qualidade do ar na região aponte para valores abaixo dos limites estabelecidos pelo CONAMA como pode ser observado nos gráficos à abaixo das Figuras 18, 19 e 20:

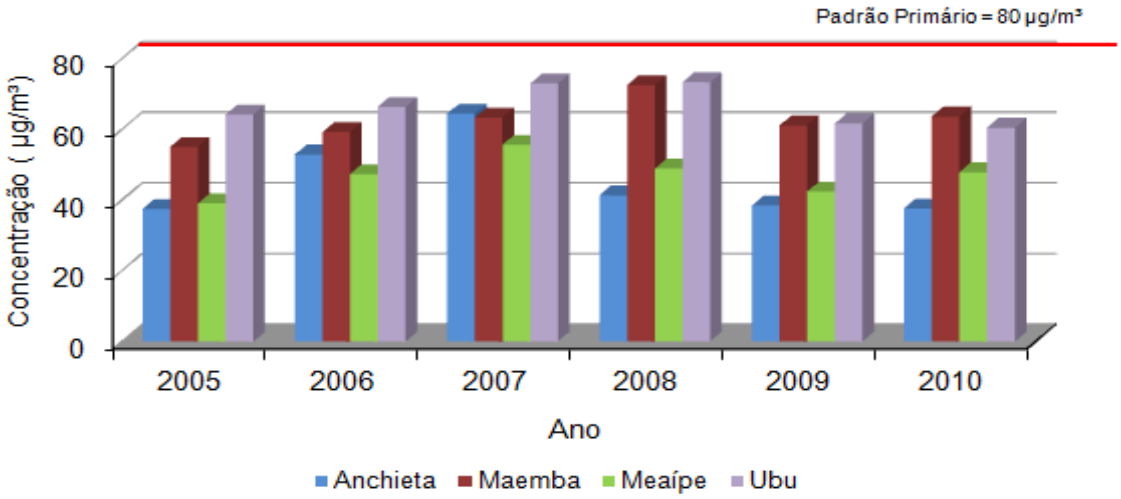


FIGURA 18 - EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO ANUAL DE PTS (µG/M³) MEDIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE DO AR DA REGIÃO. FONTE: IEMA, 2010.

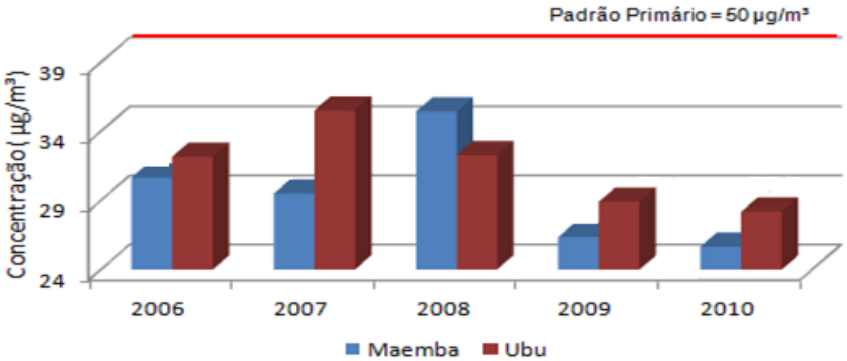


FIGURA 19 - EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO ANUAL DE PM10 (µG/M³) MEDIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE DO AR DA REGIÃO. FONTE: IEMA, 2010.

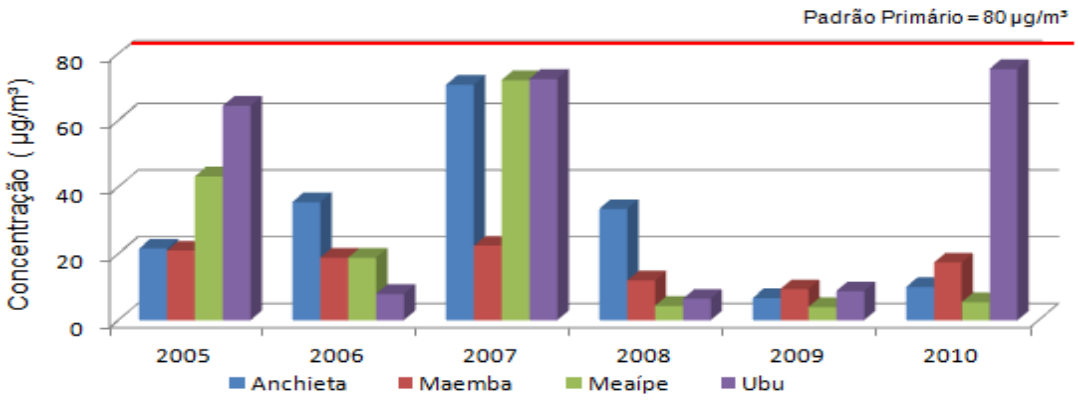


FIGURA 20 - EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO ANUAL DE SO2 (µG/M³) MEDIDO NAS ESTAÇÕES DE QUALIDADE DO AR DA REGIÃO. FONTE: IEMA, 2010.

Na Figura 17, observa-se que as concentrações de partículas totais em suspensão (PTS) nas localidades de Ubú e Mãe-Bá encontram-se na maior parte do tempo em patamares elevado, chegando a alcançar mais de 75% do limite estabelecido pelo padrão primário da Resolução Conama 03/1990, no ano de 2010. Nas localidades de Anchieta e Meaípe as concentrações de PTS apresentam menor magnitude nos últimos anos.

Na Figura 18, nota-se que as maiores concentrações deste poluente foram observadas na estação Ubú, com exceção do ano de 2008, quando a concentração na estação de Meaípe atingiu mais de 70% do padrão primário legal vigente.

Na Figura 19, verifica-se que as concentrações de SO_2 monitoradas na região se encontram atualmente dentro dos padrões primários, contudo as concentrações anuais para a estação de Úbu nos anos de 2005, 2007 e 2010 a alcançar mais de 75% do limite estabelecido pelo padrão primário. Sendo que no ano de 2007, as concentrações anuais também foram superiores a 75% do padrão primário para as estações de Anchieta e Meaípe.

Pode-se observar na Tabela 1 a razão entre a concentração de PM10 e PTS para os anos de 2006 a 2010 nas estações de qualidade do ar de Mãe-bá e Ubú.

TABELA 1 - RAZÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE PM10 E PTS PARA OS ANOS DE 2006 A 2010.

Ano	Mãe-bá	Ubú
2006	0.52	0.48
2007	0.47	0.49
2008	0.49	0.44
2009	0.43	0.47
2010	0.40	0.47
Média	**0.46**	**0.47**

A partir da Tabela 1 tem-se que em ambas as estações de monitoramento de qualidade do ar a razão entre os poluentes PM10 e PTS são próximas, tendo como valor 0,46 para a estação de Mãe-bá e 0,47 para a estação de Ubú.

No estudo Avaliação Ambiental Estratégica do Pólo industrial e de Serviços de Anchieta de 2008 foi verificada a concentração dos poluentes gasosos (NO_x, O_3, CO e Hidrocarbonetos) através de campanha de monitoramento específica realizada opor meio de uma estação automática que ficou instalada no local por cerca de 70 dias.

Observou que no geral esses poluentes apresentam níveis baixos em toda a área estudada, exceto para o ozônio (O_3), cujas concentrações medidas em Anchieta alcançam, no máximo, 63% do padrão primário de qualidade do ar.

Ressalta-se ainda que a composição básica dos materiais particulados dispersos na atmosfera na região advém além dos processos industriais, de queimadas, atividades da construção civil, movimentações veiculares em vias não pavimentadas e pavimentadas, e também de aerossóis marinhos, conforme estudos recentes de caracterização das PTS monitoradas.

Visando melhorias no monitoramento da qualidade do ar local, a Fundação Espírito-Santense de Tecnologia da Universidade Federal do Espírito Santo (FEST), junto à Samarco, realizou em 2007, a análise química da poeira coletada nas estações de monitoramento, de forma a determinar a contribuição de cada fonte existente no entorno da empresa. Para esta análise foram utilizados modelos receptores de balanço de massa à contribuição de cada fonte, e os resultados foram apresentados no documento "Identificação de Fontes de Material Particulado na Região de Influência Direta da Samarco" – 2007 – FEST citado *Plano de Controle Ambiental do Terminal Marítimo de Ubú – Anchieta/ES.*

Os pontos de monitoramento do modelo receptor coincidem com os das estações de monitoramento da qualidade do ar para as estações de Mãe-Bá, PM10 e Ubú, PTS. Os resultados para o ano de 2007 do modelo receptor são apresentados em conjunto com o monitoramento da qualidade do ar. Para consecução do modelo receptor, foi utilizada a versão CMB8.2, cedida pela EPA em agosto de 2005.

Nos gráficos das Figuras 21 e 22 são apresentados os resultados deste estudo, que informa a contribuição média percentual das fontes para PTS e PM_{10} em 2007 na região de Anchieta.

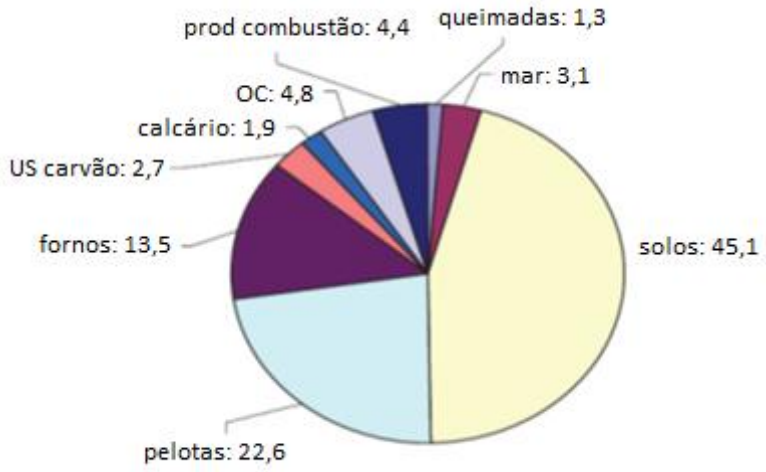


FIGURA 21 - CONTRIBUIÇÃO MÉDIA PERCENTUAL DAS FONTES PARA PTS EM 2007 NA ESTAÇÃO DE UBÚ.
Fonte: Identificação de Fontes de Material Particulado na Região de Influência Direta da Samarco, 2007 – FEST apud RCA/PCA do Terminal Marítimo de Ubú – Anchieta - Samarco e Cepermar, 2011.

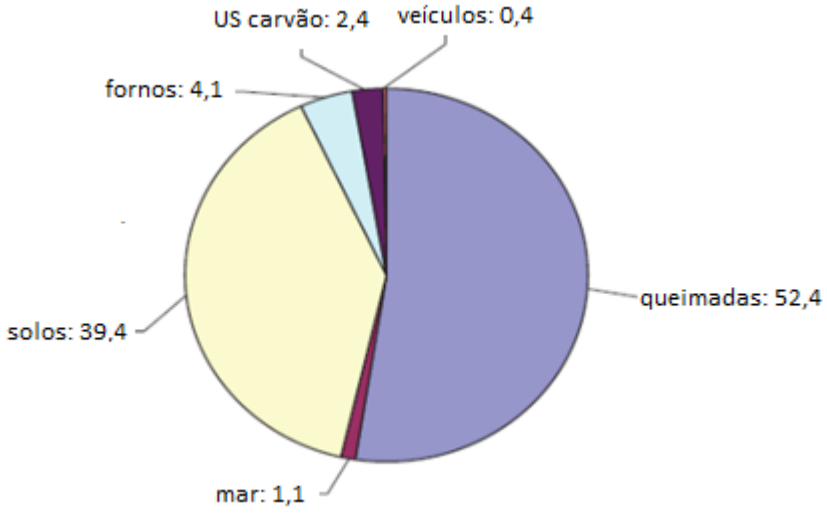


FIGURA 22- CONTRIBUIÇÃO MÉDIA PERCENTUAL DAS FONTES PARA PM10 EM 2007 NA ESTAÇÃO DE MÃE-BÁ.
Fonte: Identificação de Fontes de Material Particulado na Região de Influência Direta da Samarco, 2007 – FEST apud RCA/PCA do Terminal Marítimo de Ubú – Anchieta - Samarco e Cepermar, 2011.

.

As contribuições são oriundas de diversas fontes de origens antropogênicas (fontes industriais, queimadas, ressuspensão de poeira ocasionada por tráfego de veículos etc.), e de fontes biogênicas (aerossóis marinhos, solos etc.).

Observa-se na Figura 21 que a fonte que mais contribui para os valores de PTS observados na qualidade do ar da região são os solos, seguida de pelotas e fornos de pelotização. Portanto, a contribuição média total estimada para as fontes da Samarco é 41%.

Na Figura 22 observa-se que a predominância da contribuição das fontes são para solos e queimadas e a participação total média das fontes da Samarco fica em cerca de 6,5 %.

5.1.4. Uso e ocupação do solo

Na Figura 23 observa-se o mapa de uso e ocupação do solo na região de Anchieta, com destaque para a área de estudo.

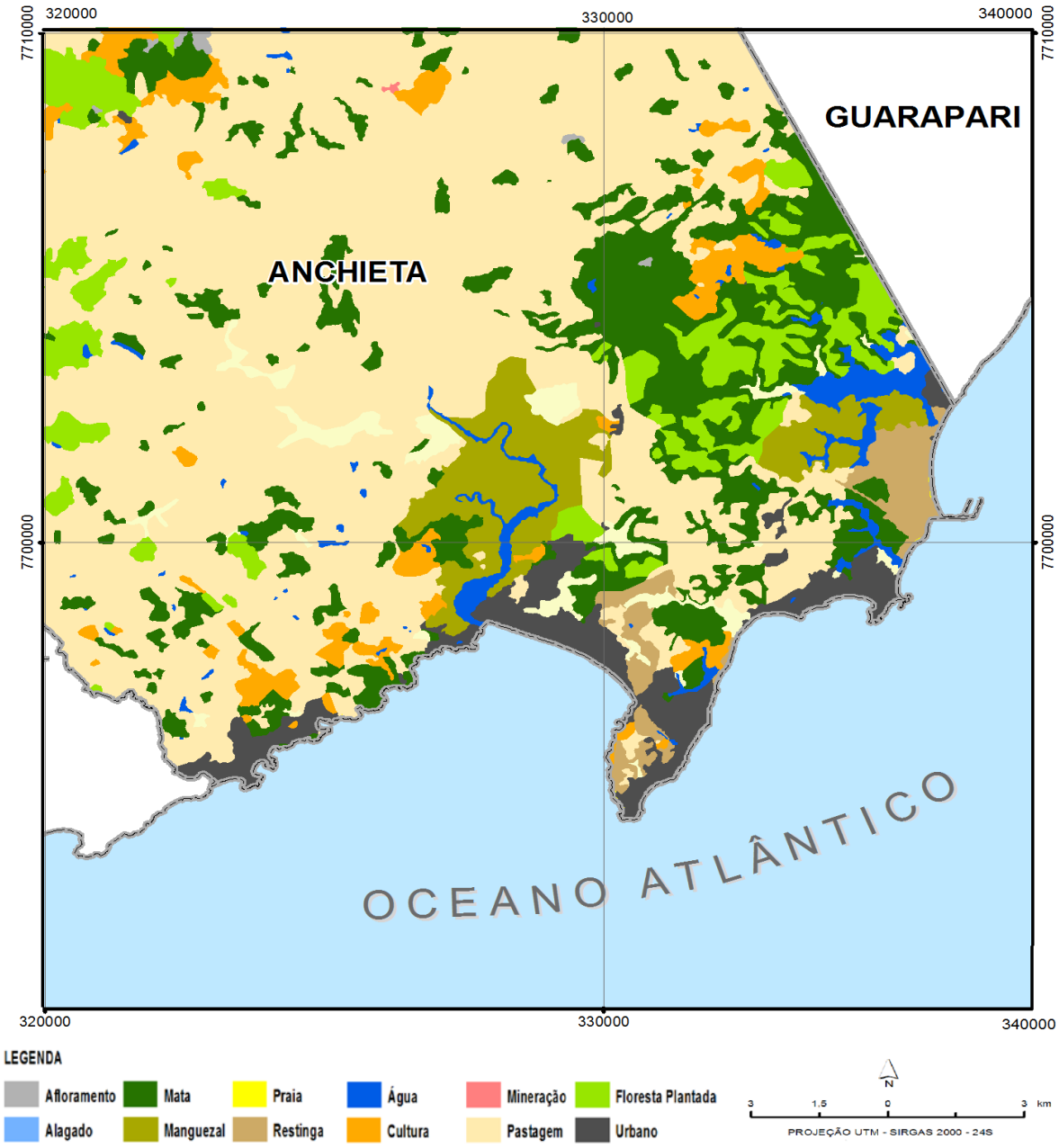


FIGURA 23 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM ANCHIETA
Fonte: Adaptado de IJSN, 2012.

Conforme se verifica na figura acima, as áreas de pastagem absorvem a maior parte da área territorial da região de estudo. Também são expressivas as áreas de matas e florestas. Ainda há expressividade na região os pontos de área agrícola, que geralmente representam lavouras permanentes. Quanto à densidade urbana está se concentra no faixa costeira. Observa-se ainda que o empreendimento da Samarco encontra-se localizada próxima a importantes ecossistemas, tais como manguezal e restinga.

5.2. INVENTÁRIO DE FONTES DA REGIÃO

Neste tópico, será realizada uma transcrição dos principais resultados obtidos no inventario de fontes da área de influencia da Samarco Mineração na região de Ubú, disponibilizados pelo órgão de meio ambiente do estado IEMA.

O inventário da Samarco abrange toda a área de influência do Complexo Industrial e Portuário da Samarco na Ponta de Ubú, incluindo a Unidade de Tratamento de Gás do Sul Capixaba (UTG-Sul) da PETROBRAS. Esses dois grandes empreendimentos são os principais responsáveis pelas emissões de poluentes atmosféricos de origem industrial da região.

O diagnóstico das emissões atmosféricas foi realizado considerando as taxas médias de emissões para os seguintes poluentes: material particulado total (MPT); partículas inaláveis grossas (PM_{10}); partículas inaláveis finas ($PM_{2,5}$); óxidos de nitrogênio (NO_x); dióxido de enxofre (SO_2) e monóxido de carbono (CO). Para tanto, foram considerados os seguintes tipos de fontes:

- Origem industrial: que são a Samarco Mineração (Usinas I, II e III), sua área portuária e a Unidade de Tratamento de Gás Sul Capixaba (UTG-Sul) da PETROBRAS.
- Origem veicular: que são as vias internas e externas a Samarco.

O Quadro 4 apresenta um resumo das fontes e seus tipos (pontuais e extensas) considerados no inventário:

QUADRO 4 - FONTES INVENTARIADAS NAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA DA SAMARCO MINERAÇÃO.

Unidade		**Fontes consideradas**
Samarco Mineração	Usina I	Fontes do tipo pontuais e fontes extensas
	Usina II	Fontes do tipo pontuais e fontes extensas

	Usina III	Fontes do tipo pontuais e fontes extensas
	Porto	Fontes extensas
	Vias externas	Fontes extensas
Fontes externas à Samarco Mineração	UTG-Sul	Fontes pontuais
	Rodovias	Fontes extensas

Fonte: Inventário de emissões Samarco, 2011.

A Figura 24 mostra a localização de todas as fontes (fixas e móveis) dentro da Área de influência direta (AID) da Samarco Mineração.

FIGURA 24- ÁREA DE INFLUÊNCIA DIRETA (AID) DA SAMARCO MINERAÇÃO.
Fonte: Inventário de emissões Samarco, 2011.

No inventário da Samarco, para a quantificação das emissões foram utilizados dados de amostragens de chaminés, para as fontes de maior relevância, e fatores de emissões elaborados pelo *Midwest Research Institute* (MRI), ECOSOFT e USEPA (AP-42), para as fontes de menor relevância. Adicionalmente, foram utilizadas as informações contidas nos relatórios de monitoramento de emissões da Samarco de 2005 a 2011, garantindo assim,

dados mais precisos. A quantificação das fontes da UTG-Sul foi realizada utilizando o documento "Estudo de Modelagem Matemática da Dispersão Atmosférica da Unidade de Tratamento de Gás do Sul Capixaba – UTG -Sul", fornecido pelo IEMA.

Para as fontes de origem veicular, a quantificação foi realizada por meio da contagem de veículos pequenos (motocicletas), leves (automóveis) e pesados (ônibus e caminhões), das principais vias internas e entorno da Samarco Mineração. Essas vias representam mais de 90% da circulação de veículos na área de influencia da Samarco Mineração. Para isso, foram utilizados fatores de emissões veiculares da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2010, 2011b) e da USEPA (AP-42, 2011) para ressuspensão de poeira asfáltica provocada pelo tráfego de veículos na região.

No inventário foram calculadas taxas de emissão para, para 8 vias externas (VE) e 4 vias internas (VI). O resultado das estimativas das taxas de emissões móveis, para os poluentes PM_{10} e PTS, nas suas variações horárias, são mostrados na Figura 25 e 26.

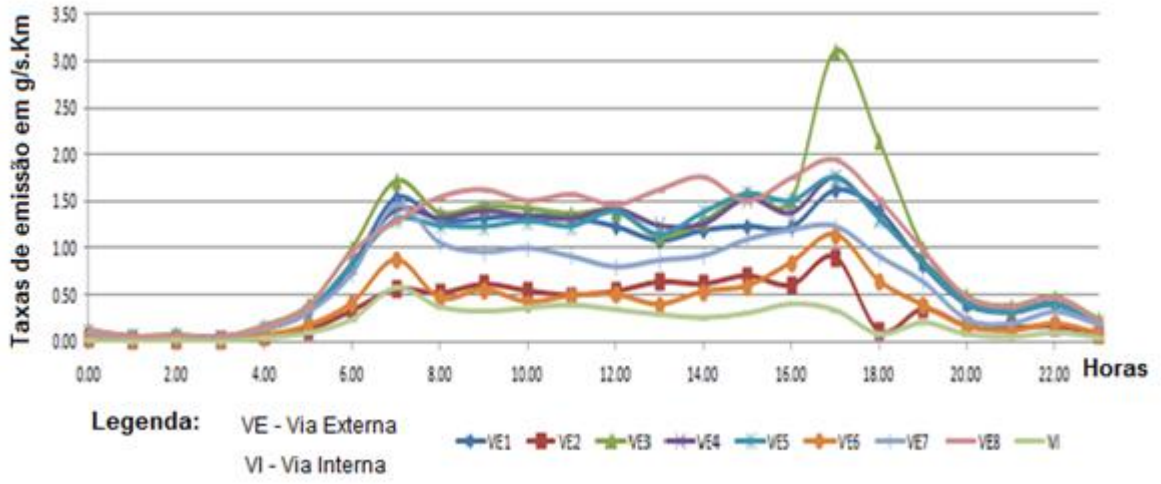


FIGURA 25– VARIAÇÃO HORÁRIA DAS EMISSÕES DE PM10 DAS FONTES MOVEIS NAS VIAS EXTERNAS (VE) E VIAS INTERNAS (VI) EM G/S.KM, NA ÁREA DE INFLUENCIA DA SAMARCO.
Fonte: Inventário de emissões Samarco, 2011.

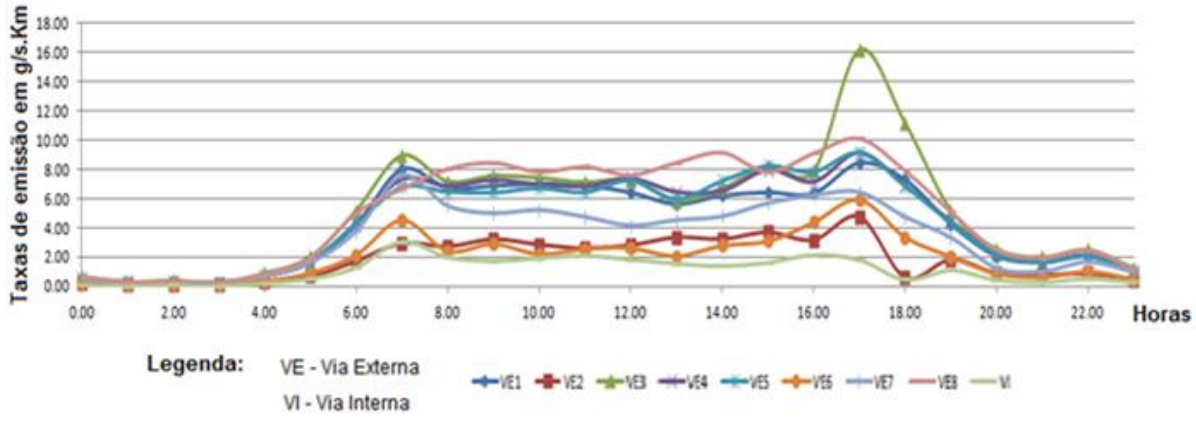


FIGURA 26- VARIAÇÃO HORÁRIA DAS EMISSÕES DE PTS DAS FONTES MOVEIS NAS VIAS EXTERNAS (VE) E VIAS INTERNAS (VI) EM G/S.KM, NA ÁREA DE INFLUENCIA DA SAMARCO.
Fonte: Inventário de emissões Samarco, 2011.

Observa-se que o período horário que apresenta as maiores taxas de emissão esta entre as sete e dezessete horas. Esse período coincide com o horário comercial, período de maior movimentação de veículos.

Na Figura 27 são apresentadas as taxas de emissões anuais dos poluentes para cada grupo de fontes representadas no inventário.

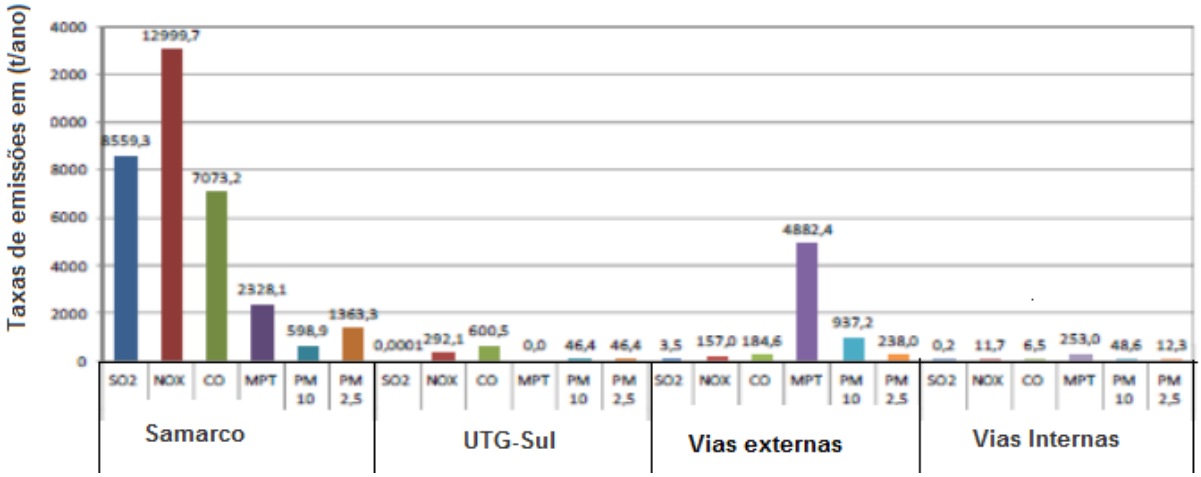


FIGURA 27 - TAXAS DE EMISSÕES ANUAIS NAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA DIRETA E INDIRETA DA SAMARCO.
Fonte: Inventário de emissões Samarco, 2011

Observa-se no Gráfico acima que as maiores contribuições dos poluentes PM10 e PTS na região são dadas pelas vias externas, seguida pela Samarco. As vias internas e UTG-Sul pouco contribuem para a emissão total destes poluentes. Contudo vale lembrar que as informações das taxas de emissões nas fontes não representam a qualidade do ar na região,

devido aos processos que os poluentes estarão submetidos depois de lançados na atmosfera. Para isso existem os modelos de qualidade do ar, que ao simularem esses processos atuantes sobre o poluente na atmosfera, poderão predizer as concentrações médias no entorno da(s) fonte(s).

6. METODOLOGIA

6.1. DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL E MALHA DE RECEPTORES

O domínio computacional foi definido de maneira a conter todas as fontes contempladas no inventário de fontes da região de Ubú realizado pela empresa Samarco e fornecido pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Ainda para à definição do domínio, considerou-se a localização das estações de monitoramento, de forma que pudesse ser realizada a comparação entre os valores obtidos na simulação e o valor medido efetivamente em cada estação. O domínio também foi escolhido de modo que o Complexo Siderúrgico da Samarco, empreendimento de maior potencial poluidor na região, ficasse no centro da malha computacional de 20 quilômetros por 20 quilômetros. Adotou-se o espaçamento de 1000 metros, resultando no número total de 400 receptores, como pode ser observado na Figura 28.

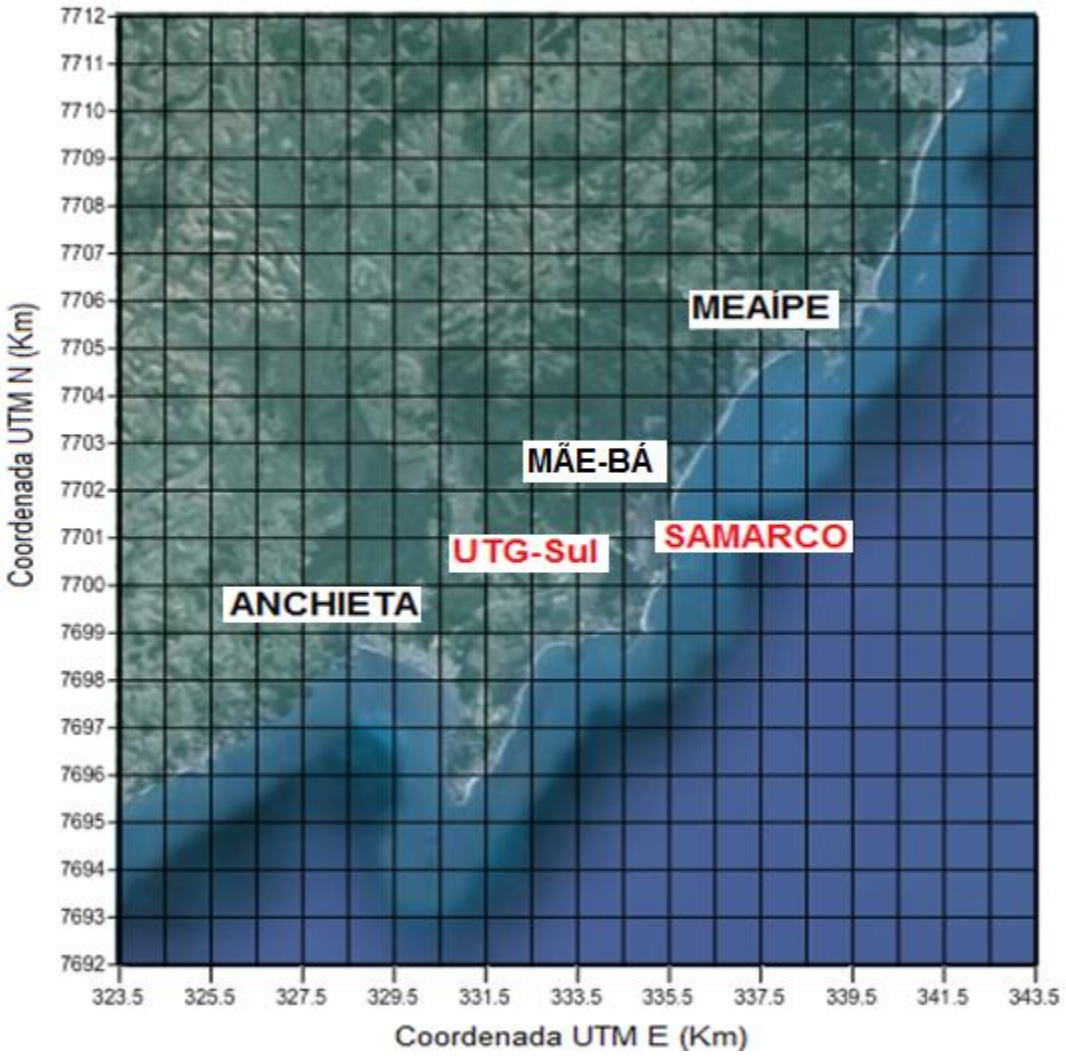


FIGURA 28 – MALHA DE RECEPTORES ADOTADA PARA A MODELAGEM, DESTACANDO OS PRINCIPAIS PONTOS DE REFERÊNCIA QUE FORAM CONSIDERADOS PARA A DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO.

6.2. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS

6.2.1. Dados Geofísicos

Os dados de elevação do terreno utilizados foram os obtidos do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission).* A Missão SRTM é um projeto conjunto entre a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O objetivo deste projeto é produzir dados topográficos digitais para 80% da superfície da terra (todas as áreas de terra entre as latitudes 60° norte e 56° Sul). A técnica utilizada foi a interferometria de radar (a bordo do ônibus espacial *Endeavour*) de abertura sintética (InSAR). Nessa técnica a altitude é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens de radar sobre um mesmo local na Terra (BARROS, CRUZ, *et al.*, 2005 apud SARNAGLIA, SILVA *et al*, 2011). Os dados brutos foram processados pela NASA e disponibilizados na forma de DEM (*Digital Elevation Models*) que está disponível gratuitamente na página eletrônica da *United States Geological Survey* (USGS) (*http://www.webgis.com/terr_us75m.html ou http://www.usgs.gov*). O produto é georreferenciado ao datum WGS84 em coordenadas geográficas decimais.

Para ambos os modelos foram utilizadas informações topográficas com resolução de 90 metros do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), no formato DEM. É necessário escolher a localização da área de estudo. No caso do Espírito Santo o arquivo é o W060S10. Para ser utilizado, ainda é necessária a mudança de extensão do arquivo baixado (.HGT), para (.DEM).

Os dados de uso e ocupação do solo são utilizados apenas no CALPUFF. Os procedimentos adotados para obtenção destes dados são descritos na seção 6.4.1 (d). No AERMOD, ao invés de escolher o uso e ocupação do solo, o modelo permite ao usuário escolher parâmetros como rugosidade, albedo e razão de Bowen, que são relacionados às categorias de uso do solo. Este procedimento é melhor descrito na seção 6.3.1.

6.2.2. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos de superfície foram retirados da Estação do Porto que está localizada na área portuária da Samarco. A Tabela 2 resume os dados necessários para identificação da estação meteorológica nos modelos de qualidade do ar.

TABELA 2 - DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO PORTO.

PARÂMETRO	
Longitude UTM (Datum WGS-84)	336781 E
Latitude UTM (Datum WGS-84)	7700876 N
Altura do sensor na torre:	10 m
Altura da base da torre:	5 m

Nesta estação são monitorados os seguintes parâmetros velocidade e direção do vento, pressão, precipitação, temperatura, umidade relativa e radiação solar. Todos os dados foram usados em suas médias horárias.

Os dados meteorológicos de altitude foram utilizados apenas no CALPUFF. Os procedimentos adotados para obtenção destes dados são descritos na seção 6.4.1 (b), complementada pelo apêndice A.

6.2.3. Inventário de fontes da região

Uma parte muito importante do processo de modelagem da dispersão atmosférica de uma dada emissão é a correta definição de sua fonte. Vários parâmetros das fontes são definidos nessa etapa e caso a importância de alguma dessas características seja menosprezada, a simulação apresentará uma grande chance de obter um resultado que não descreva corretamente a situação em questão.

Os dados da caracterização das fontes emissoras na região foram retirados do Inventário de Fontes da Área de Influencia da Samarco de 2011 disponibilizado pelo IEMA. O inventário contempla fontes do tipo pontual (chaminés) e extensas, como carregamento, descarregamento, transferência, vias, entre outros.

As informações contidas no inventário para as fontes de origem industrial são:

- Identificação da fonte;
- Setor em que a fonte se encontra;
- Tipo de emissão (pontual ou extensa);
- Forma de controle;
- Combustível utilizado (quando aplicável);
- Material emitido;
- Posição geográfica em coordenadas UTM;

- Diâmetro (quando aplicável);
- Altura de emissão em relação ao solo;
- Elevação do solo em relação ao nível do mar no ponto onde a fonte se localiza;
- Vazão da emissão em m^3/s e Nm^3/s;
- Temperatura de saída da emissão em °C;
- Porcentagem de O_2 (%)
- Concentração de MPT (Material Particulado Total), PM_{10}, $PM_{2,5}$, SO_2, NO_X e CO em (mg/Nm3)
- Emissão de MPT (Material Particulado Total), PM_{10}, $PM_{2,5}$, SO_2, NO_X e CO em t/ano, Kg/dia, Kg/h e g/s e µg/s.
- Número de dias trabalhados no ano.

Os dados para fontes móveis disponibilizados no inventário são:

- Identificação da via;
- Tipo de via (externa ou interna à Samarco);
- Posição geográfica em coordenadas UTM dos pontos iniciais e finais de cada via;
- Emissão de MPT (Material Particulado Total), PM_{10}, $PM_{2,5}$, SO_2, NO_X e CO em g/h em todas as horas do dia e para as diferentes categoria dos veículos : pesado, leves (gasolina, álcool, flex, GNV) e motocicletas.

As fontes industriais foram modeladas de duas formas diferentes, fontes pontuais e volumétricas, enquanto que as fontes móveis foram modeladas apenas em forma de fontes de área, assim como mostra o fluxograma da Figura 29:

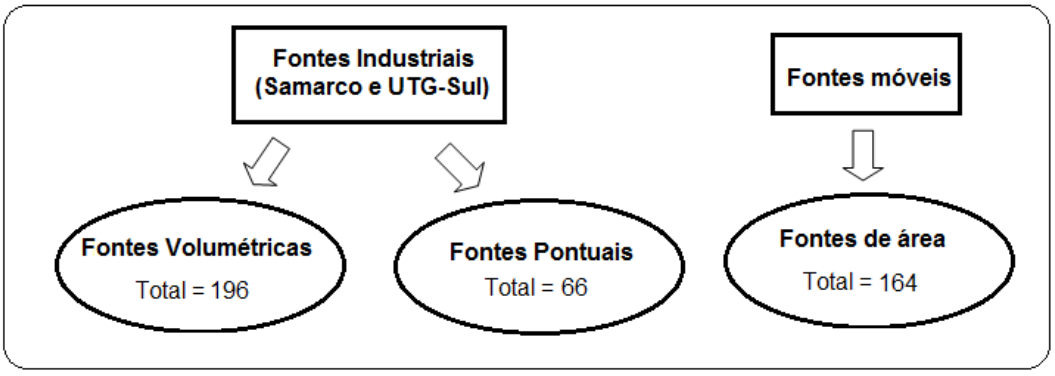


FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DA MODELAGEM DE FONTES POR TIPOS

Embora o inventário traga informações relativas a seis poluentes, adotou-se neste estudo como poluentes de referência a serem modelados apenas PM10 e MPT.

Vale ressaltar que, após serem lançados na atmosfera, o material particulado (MP) e o material particulado menor que 10 µm (MP10) passam a se denominar de partículas totais em

suspensão (PTS) e partículas inaláveis (PI), respectivamente, seguindo a nomenclatura utilizada pela resolução CONAMA 03/1990.

Quanto à taxa de emissão, é possível utilizar várias unidades diferentes nos modelos, desde que especificada adequadamente nos arquivos de controle.

A) Fontes pontuais

As principais fontes pontuais presentes no inventário são as chaminés das fábricas.

A identificação das fontes pontuais foi realizada com as inciais "FP" (Fonte Pontual) seguida do número da fonte, retirado do inventário.

A maioria dos dados para modelagem de fonte pontual são retiradas diretamente do inventário sem a necessidade de modificações. Foi necessária a conversão da temperatura de graus Celsius para Kelvin. A velocidade de saída das emissões não está presente no inventário, porém de posse dos valores do diâmetro e da vazão pela equação abaixo é possível se obter a velocidade de saída:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Sendo

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Onde
v - velocidade de saída das emissões em metro por segundo;
Q - vazão das emissões em metro cúbico por segundo;
A - área da seção transversal da chaminé;
D - diâmetro da chaminé em metros

O inventário das fontes da UTG-Sul fornece dados de vazão apenas em normal metro cúbico por segundo (Nm³/s). Por isso foi necessário utilizar a equação dos gases perfeitos para se obter a vazão real. Sendo assim

$$p_i V_i = n_i R T_i \qquad \text{e} \qquad p_r V_r = n_r R T_r$$

onde,

V_i e V_r são o volume do gás em m³ nas condições ideais e reais, respectivamente;
p_i e p_r são a pressão do gás em atm nas condições ideais e reais, respectivamente;
n_i e n_r são o número de moles do gás nas condições ideais e reais, respectivamente;
T_i e T_r são a temperatura do gás em K nas condições ideais e reais, respectivamente; e
R é a constante universal dos gases perfeitos: 8,2057 x10^{-5} (m³ · atm)/(K · mol);

Considerou-se que p_i e p_r são equivalentes, já que ambos os casos, é adotado a pressão ambiente. Também se adotou que n_i igual a n_r já que a massa de ar é a mesma. Dessa forma, obtém-se

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{n_i R}{p_i} \qquad \text{e} \qquad \frac{V_r}{T_r} = \frac{n_r R}{p_r}$$

Como $\frac{n_r R}{p_r} = \frac{n_i R}{p_i}$

então: $\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_r}{T_r} \rightarrow V_r = \frac{T_r V_i}{T_i}$

Com o novo volume obtido acima, é possível calcular a vazão nas condições reais:

$$Q_r = \frac{T_r Q_i}{T_i}$$

B) Fontes de área

As fontes de área foram usadas apenas para a representação das vias nos modelos.

Diversos guias de modelagem de qualidade do ar dos estados estadunidense apontam diferentes procedimentos para a modelagem de vias terrestres. Os estados de Novo México, Carolina do Norte, Oklahoma e Texas orientam a modelagem das vias como pequenas fontes volumétricas adjacentes. Enquanto os estados de Missouri, Nebraska, Nevada, Carolina do Sul e Vermont orientam o uso de fontes de área. E, o estado da Louisiana orienta o uso de diversas fontes pontuais para representar a via (HEINERIKSON, 2004 apud SILVA, SARNAGLIA, 2010).

Como dito anteriormente, o método adotado para as vias foi representação por fontes de área, visto que a representação por pontos apresenta muitas limitações, por não conseguir simular com precisão a emissão de forma continua ao longo de toda via e por requerer um número muito grande de fontes. Quanto à representação por volume, essa requer um grande número volumes discretos para a simulação. Portanto a opção de representação das vias por fontes de área proporciona um ganho computacional na modelagem.

No inventário de fontes móveis da Samarco foram apresentadas as taxas de emissão, com variação horária, para oito vias externas (VE) e quatro vias internas (VI), como mostra a Figura 30.

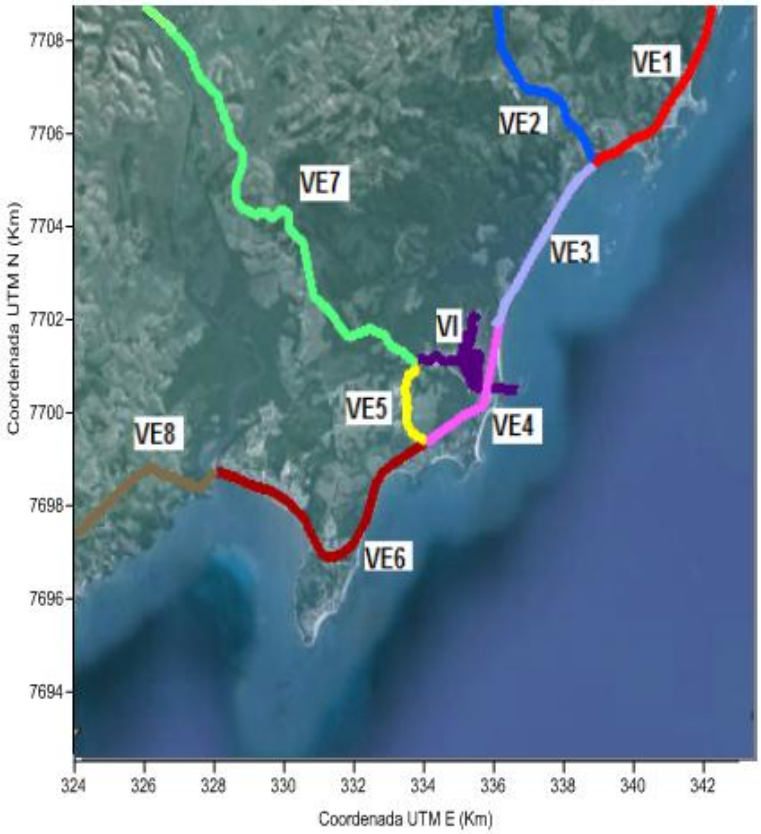


FIGURA 30 – VIAS EXTERNAS E INTERNAS DO INVENTÁRIO DE EMISSÕES DA SAMARCO

No Quadro 5 é apresentado as coordenadas do ponto inicial e final de cada via, bem como a extensão total da via.

QUADRO 5 – LOCALIZAÇÃO DAS VIAS EXTERNAS E INTERNAS À SAMARCO.

Via	Trecho	Extensão (km)	Coordenadas Geográficas UTM (Datum WGS 84)			
			Inicial		Final	
			X (UTM)	Y (UMT)	X (UTM)	Y (UMT)
Vias Externas						
VE1	Meaípe x Trevo de Meaípe	4,65	341685.66	7708712.83	338450.92	7705832.17
VE2	BR 101 x Trevo de Meaípe	4,46	338346.12	7705602.11	335842.40	7708709.55
VE3	Trevo de Meaípe x Portaria da Samarco	4,64	338454.29	7705935.47	335859.58	7702057.65
VE4	Portaria da Samarco x Trevo de Ubú	3,76	335859.58	7702057.65	333827.15	7699304.41
VE5	Trevo de Ubú x Portaria 02 da Samarco	2,22	333827.15	7699304.41	333466.12	7701110.47
VE6	Anchieta x Trevo de Ubú	8,05	327775.01	7698521.60	333827.15	7699304.41
VE7	Portaria 02 da Samarco x BR 101	12,33	333466.12	7701110.47	326316.21	7708714.50
VE8	Anchieta x Piúma	3,76	327775.01	7698521.60	324491.22	7697524.32
Vias Internas						
VI1	Portaria PV-04 da Samarco x Ponto Interno	1,40	333542.00	7701174.00	334730.00	7701198.00
VI2	Ponto 01-interno x Porto Samarco	2,10	334730.00	7701198.00	336408.00	7700495.00
VI3	Ponto 01-interno x Estacionamentos	1,40	334730.00	7701198.00	335228.00	7702243.00
VI4	Portaria PV-01 da Samarco x Estacionamentos	2,60	334730.00	7701198.00	335072.00	7701417.00

De posse dos pontos citados acima, pode-se localizar as vias responsáveis pelas emissões no *software Google Earth.*

Para representar as vias como fonte de área foi necessário transformar a reta que delimitava cada trecho em um retângulo. Essa transformação foi realizada com na metodologia usada por SILVA e SARNAGLIA (2010) As equações abaixo representam o procedimento adotado:

$\Delta x = x_2 - x_1$
$\Delta y = y_2 - y_1$

Onde

x_1 e x_2 representam, respectivamente, a coordenada E em UTM do ponto inicial e final da reta que representa o trecho em questão; e

x_1 e x_2 representam, respectivamente, a coordenada N em UTM do ponto inicial e final da reta que representa o trecho em questão.

Se $\Delta x = 0$
$x'_i = x_i + L_v$
$y'_i = y_i$

Se $\Delta x \Delta y > 0$
$x'_i = x_i - L_v sen\theta$
$y'_i = y_i + L_v cos\theta$

Se $\Delta x \Delta y < 0$
$x'_i = x_i + L_v sen\theta$
$y'_i = y_i + L_v cos\theta$

Sendo que θ
$\theta = arctg\left(\left|\frac{\Delta y}{\Delta x}\right|\right)$ e $L_v = L_p N_p$

Onde:
x'_i e y'_i representam as coordenadas dos pontos complementares do polígono (i é o índice relativo ao ponto);
L_v é a largura total da via;
L_p é a largura de cada pista (foi adotado o valor de 3 metros);
N_p é o número de pistas da via (verificado para cada via no software Google Earth).

A Figura 31 resume o procedimento adotado. Os pontos vermelhos representam o ponto inicial e final de cada trecho (dados retirados do Google Earth). Já os pontos amarelos,

obtidos a partir da equação acima, indicam os pontos utilizados para formar o retângulo que caracteriza o trecho no modelo (SILVA e SARNAGLIA, 2010).

FIGURA 31 – MODELAGEM DE FONTES MÓVEIS.
Fonte: SILVA e SARNAGLIA, 2010.

Observa-se também na Figura 31, que foi necessário dividir a via em vários trechos para a adequação do seu percurso, principalmente nas curvaturas e rotatórias das pistas. Ao final foram contabilizados 164 trechos.

De posse desses quatro pontos, pode-se caracterizar um polígono que represente a via. Ainda foi possível determinar o comprimento e a área de cada trecho, pelas equações:

$$C = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \text{ e } A = C.Lv$$

Onde

C – é o comprimento da pista em metros

A – é área do polígono que representa o trecho

A elevação do solo foi calculada por meio da média aritmética entre as elevações do ponto inicial e final de cada trecho, esses obtidos no *software Google Earth*.

A altura efetiva foi adotada em 0,5 metros.

O procedimento para a obtenção da dimensão vertical inicial (σz_0) da pluma seguiu as orientações do Departamento de Qualidade Ambiental de Oklahoma (ODEQ, 2008). Segundo essas orientações, o σz0 é obtido pela seguinte equação:

$$\sigma z_0 = Hf/2.15$$

Sendo

$$Hf = 2Hv$$

Onde

Hf: Representa a altura efetiva da fonte em metros;

Hv: Representa a altura média dos veículos em metros;

Como foi adotado o valor de 1,5 metros para altura média dos veículos, então σz_0 foi estimado em 1,40 metros.

Para o cálculo das taxas de emissões por trecho as taxas de veículos leves, pesados e motocicletas foram somadas. Como o inventário apresenta a emissão do poluente para toda via e não de cada trecho, a emissão teve que ser calculado para os trechos de acordo com a relação entre o comprimento do trecho e o comprimento total da via. A equação a seguir apresenta esse procedimento:

$$E_{trecho} = \frac{E_{via}\, L_{trecho}}{L_{via}}$$

Onde:

E_{trecho}: Emissão de cada trecho em g/h;

E_{via}: Emissão total da via em g/h;

L_{via}: Comprimento total da via em metros;

L_{trecho}: Comprimento de cada trecho da via em metros.

Para a conversão da unidade de g/h para g/s dividiu as taxas de emissão por 3600.

Após essa etapa foi necessário dividir a emissão de cada trecho pela área do mesmo, para que a emissão fosse inserida no modelo em g/s.m².

Para o cálculo dessa taxa, foi somada a emissão de todas as fontes e esse valor foi dividido pela área total do empreendimento. Esse cálculo é representado na fórmula abaixo:

$$E'_{trecho} = \frac{E_{trecho}}{A_{trecho}}$$

onde,

E'_{trecho}: Emissão do trecho em unidade de área (g/m².s);

E_{trecho}: Emissão total da área do trecho em g/s;

A_{trecho}: Área total do trecho.

E por fim, a identificação das fontes que foi realizada com base na localização da via (VE – Via Externa à Samarco ou VI – Via Interna à Samarco), no número da via segundo a ordem dada pelo inventário, a inicial T da palavra trecho e por último o número do trecho, especificado em ordem crescente para cada via, do ponto inicial ao final da via. Ou seja, a fonte VE5T2, representa a fonte situada na via externa 5 e no segundo trecho desta via.

Novamente, vale ressaltar que a maior contribuição das taxas de emissões anuais totais na área do inventário, para os poluentes MPT e PM_{10} é dada pelas fontes móveis. Esta informação pode ser confirmada no gráfico das Taxas de emissões anuais nas áreas de influência direta e indireta da Samarco apresentado na seção 5.2. Além disso, segundo a referência Avaliação Ambiental Estratégica do Pólo industrial e de serviços de Anchieta mostra que a frota veicular na região é crescente, em proporção equivalente aos níveis experimentados na média do Estado, o que torna mais imperativo considerar essas vias como fontes poluidoras na modelagem.

Contudo atualmente a frota de veículos na região quando comparado na sua totalidade com a frota da Região da Grande Vitória - RGV, essa pode ser considerada baixa. Segundo os dados do DETRAN em 2010 a frota de Anchieta era próxima de 6.616 veículos, enquanto que a frota na RGV era próxima de 560.367 veículos.

C) Fontes de volume

As fontes de volume presentes no inventário representam pontos de transferência, de empilhamento, de recuperação, de carregamento e descarregamento, de estocagem e outros pontos onde há emissão fugitiva. As fontes volumétricas foram identificadas com as iniciais “FV” (Fontes Volumétricas) seguida do número da fonte, retirado do inventário.

A altura efetiva é considerada a altura do centro do volume da fonte em relação ao solo. A Figura 32 representa um exemplo de fonte volumétrica. A emissão é causada devido a um ponto de transferência de matéria-prima. A altura efetiva é representada pelo símbolo H_e enquanto que a altura e largura do volume são representadas, respectivamente, por H e L.

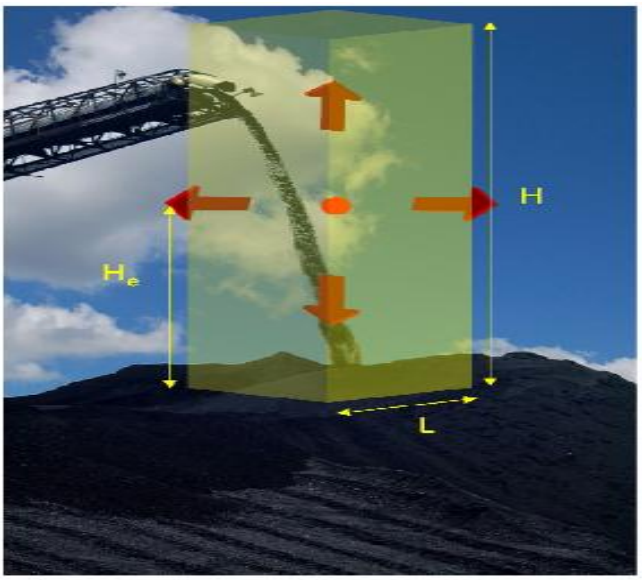


FIGURA 32 – MODELAGEM DE UMA FONTE VOLUMÉTRICA.
Fonte: Adaptado de SILVA e SARNAGLIA, 2010.

O inventário da Samarco não traz as dimensões das fontes extensas. A solução encontrada para estimar essas dimensões foi o uso de um inventário de fontes completo de outro complexo siderúrgico localizado no mesmo Estado. Para correlacionar os dados dos inventários, foram usados como parâmetros a altura, a vazão e função (transferência, carregamento, empilhamento, etc.) da fonte. Ainda usou como referência o Relatório de Impacto Ambiental da área portuária da Samarco que contêm as dimensões de algumas fontes. Em casos onde as informações quanto às características das fontes e o diâmetro da mesma não estavam disponíveis, foram adotados valores médios para a largura das mesmas. Por fim as estimativas das dimensões das fontes foram verificadas, quando possível, pelo programa do Google Earth.

O inventário de referência determina a base do volume como circular, já que apresenta o dado de diâmetro equivalente. Por definição, as fontes de volume simuladas são todos prismas retangulares retos de base quadrada. Portanto é necessária a conversão do dado de diâmetro equivalente para a dimensão L. Para realizar esta conversão foram utilizadas as seguintes equações:

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \text{ e } A_q = L^2$$

Onde
A_c e A_q: Áreas de base circular e quadrada, respectivamente;
D: Diâmetro equivalente;
L: Lado do quadrado.
Como as áreas da base do volume devem ser equivalente, então:

$$A_c = A_q \quad \rightarrow \quad \frac{\pi D^2}{4} = L^2 \quad \rightarrow \quad L = \frac{D\pi^{1/2}}{2}$$

Essa conversão de geometria de base é fundamental para definição da dimensão lateral inicial da pluma (**σy_0**) que é obtida em função da largura da base do volume, de acordo com o manual de utilização do modelo de dispersão AERMOD e varios outros guias de modelagem de dispersão atmosférica dos estados estadunidense.

Essa formulação é apresentada no Quadro 6.

QUADRO 6 - PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES INICIAIS.

TIPO DE FONTE	DIMENSÕES INICIAIS
Dimensão Lateral Inicial - σy_0	
Apenas uma fonte isolada	σy_0 = comprimento lateral do volume dividido por 4,3
Uma linha representada por fontes volumétricas adjacentes	σy_0 = comprimento lateral do volume dividido por 2,15
Uma linha representada por fontes volumétricas separadas	σy_0= distância entre os centros dos volumes dividido por 2,15
Dimensão Vertical Inicial - σz_0	
Altura efetiva da fonte ao nível do solo	σz_0 = altura da fonte dividida por 2,15
Fonte elevada adjacente ou em uma estrutura	σz_0 = altura da estrutura dividida por 2,15
Fonte elevada não adjacente e não localizada em uma estrutura	σz_0 = altura da fonte dividida por 4,30

Fonte: EPA, 2004a.

Como neste estudo todas as fontes de volume foram consideradas fontes simples isoladas, ou seja, sem a interferência de fontes próximas, então a equação para determinar **σy_0** foi:

$$\sigma y_0 = \frac{L}{4{,}3}$$

O procedimento para a obtenção da dimensão vertical inicial (σz_0) também seguiu apresentada no quadro descrito acima. Como não estavam disponíveis informações detalhadas sobre cada fonte a respeito das condições lançamento de cada uma, foi adotado que: fontes com altura efetiva acima de 10 metros foram consideradas como fontes elevadas, enquanto que fontes com altura efetiva abaixo de 10 metros foram consideradas posicionadas ao nível

do solo. Não foi necessária nenhuma estimativa da altura da fonte efetiva, já que o inventário da Samarco apresenta este dado para cada fonte.

6.3. SISTEMA DE MODELAGEM AERMOD

6.3.1. AERMET

Para a inserção dos dados de entrada deste pré-processador foi utilizada a planilha de dados medidos na Estação de Ubú no ano de 2010 cedidos pela Samarco. Os dados necessários foram formatados de forma a ser reconhecida pelo programa e as unidades, quando necessário, foram convertidas para as unidades indicadas no manual do AERMET. Segue no Quadro 7 as variáveis consideradas com seu código de leitura.

QUADRO 7 - VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO PRÉ-PROCESSADOR AERMET.

Código da variável	Nome da variável	Unidade
OSYR	Ano	-
OSMO	Mês	-
OSDY	Dia	-
OSHR	Hora	-
PAMT	Precipitação Atmosférica	Cm
PRES	Pressão Atmosférica	Millibars*10 (= hPa)
INSO	Radiação Solar	W/m²
RH01	Umidade Relativa	%
WD01	Direção do Vento	º
TT01	Temperatura	ºC
WS01	Velocidade do Vento	m/s

As conversões que foram necessárias de ser realizadas foram para a precipitação atmosférica e a pressão atmosférica. Para converter a precipitação atmosférica de milímetro, como foi recebido o dado, para centímetro, foi necessária a divisão por 10. Já a conversão dos valores de pressão atmosférica não foi necessário, uma vez que a unidade recebida, hecto-Pascal (hPa) tem o mesmo valor que a unidade lida pelo AERMET, o millibars*10.

No AERMOD, é possível selecionar parâmetros como rugosidade, albedo e razão de Bowen, que são relacionados às categorias de uso do solo. Na Tabela 3, são apresentados os valores desses parâmetros na categoria de uso do solo urbano, categoria adotada para região do estudo.

TABELA 3- PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE

Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade
0,2	1,0	0,5

Fonte: Adaptado de VELLOSO, 2007.

6.3.2. AERMAP

Para o pré-processador AERMAP determinar a elevação da base das fontes e dos receptores é necessário um levantamento topográfico do local. Para isso, utilizou-se os dados realizados pela missão SRTM (*Shutle Radar Topography Mission*) realizada pela USGS/NASA (*United States Geological Survey)*, disponíveis sem custo para o usuário no site da USGS.

No arquivo de entrada é necessário incluir as coordenadas limite do *grid* receptor e de todas as fontes emissoras. É importante ressaltar que as coordenadas dos das fontes devem estar corretamente identificadas com o código da variável escolhido, como no inventário de fontes.

6.3.3. AERMOD

Para o correto funcionamento do modelo é necessário inserir na mesma pasta os arquivos de saída do AERMET (AERMET.pfl e AERMET.sfc) e o arquivo de saída do AERMAP (aermap.rou) além do arquivo de entrada, explicado abaixo.

- Bloco de Controle: Deve ser informado os seguintes parâmetros:
    - Título da modelagem;
    - Opção de modelo;
    - Médias temporais desejadas;
    - Poluente a ser modelado;
    - Arquivo de saída dos erros de modelagem.
- Bloco de Fontes: Onde se insere as informações acerca das fontes a ser modeladas. Foram utilizadas:
    - Localização;
    - Parâmetros (Variam de acordo com o tipo de fonte a ser modelada);
        - Pontuais:
            - Taxa de emissão (g/s);
            - Altura de lançamento (m);
            - Temperatura de saída do gás (K);
            - Velocidade de saída do gás (m/s);
            - Diâmetro da fonte (m).
        - Volumétricas:

- Taxa de emissão (g/s);
- Altura de lançamento (m);
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m);
- Dimensão Lateral Inicial da Pluma (m).

▪ Areapoly:

- Taxa de emissão (g/(s.m²));
- Altura de lançamento (m);
- Número de Vértices;
- Dimensão Vertical Inicial da Pluma (m) (opcional).

É importante ressaltar que para a modelagem de vias de tráfego foi escolhido a considerações das mesmas como fontes Areapoly, após um teste se sensibilidade entre a mesma e a fonte área, como se encontra no Apêndice B. Para os cálculos foi considerado o fator de emissão veicular variante em relação às horas do dia, utilizando o parâmetro EMISFACT seguido se HROFDY (indicador de variação a cada hora do dia), e os fatores de emissão horários para cada fonte emissora.

- Definição dos grupos de fontes a serem modelados.

- Bloco de Receptores:
  - Com utilização de topografia, chama-se o arquivo de saída do AERMAP (aermap.rou) que contém as informações e elevação dos pontos receptores.
- Bloco de Meteorologia:
  - Local para indicar os arquivos de saída do AERMET (AERMET.pfl e AERMET.sfc).
- Bloco de Saída:
  - Onde se define os arquivos de saída, em que foi utilizado as máximas de 1 hora, 24 horas e anual, além das médias horárias.

A partir dos arquivos de saída, com o auxilio do software Surfer Golden versão 9.0, pode-se plotar os gráficos de concentração.

6.4. SISTEMA DE MODELAGEM CALPUFF

Neste estudo foram utilizados os modelos CALMET e CALPUFF nas versões aprovadas pela EPA para os estudos regulatórios (versão 5.8 - Level 070623), disponíveis no site http://www.src.com/. Optou-se pela interface gráfica (CALPUFF GUI), devido à facilidade de

uso do sistema de modelagem proporcionada por esta interface com o usuário. Ao indicar o diretório de trabalho, a interface CALPUFF GUI é capaz de gerar o arquivo de controle dos pré-processadores, do processador de dados meteorológicos (CALMET), do programa que calcula as concentrações (CALPUFF), e dos pós-processadores (PRTMET e CALPOST), além de executar o modelo. Ainda, a interface facilita na seleção das opções da modelagem, como por exemplo: os poluentes a serem avaliados, os processos de deposição e transformação química, características das fontes, do receptor, da malha computacional, tempo de média nos arquivos de saída, etc.

Ainda é possível escolher a opção de verificar ou não as seleções feitas quanto ao Guia Regulatório da EPA. Dessa forma, quando escolhida a opção para a verificação, como foi caso para o presente estudo, mensagens são exibidas quando as seleções são contrárias à regulamentação.

A metodologia do sistema de modelagem CALMET/CALPUFF é dividida em três partes principais: processamento dos dados meteorológicos e geofísicos no CALMET, processamento do CALPUFF onde a modelagem da dispersão dos poluentes é efetivamente realizada e por último uso dos pós-processadores que prepara os arquivos de saída para visualização, uma vez que são gerados em formato binário.

6.4.1. CALMET

a) Dados de entrada

As informações necessárias para a inicialização do CALMET são compostas por dados meteorológicos horários em superfície, dois perfis diários de dados de altitude e dados geofísicos, compostos por elevação do terreno e categorias de uso do solo.

Os dados meteorológicos de superfície são compostos por velocidade e direção do vento, temperatura, cobertura de nuvens, altura de teto de nuvens, pressão em superfície, umidade relativa, razão de mistura e precipitação. Os dados de altitude, originários de sondagens, devem fornecer dois perfis verticais diários de velocidade e direção do vento, temperatura, pressão e elevação (altura). No caso de não existirem dados em todos os níveis, o CALMET interpola os valores das variáveis entre dois níveis, através de médias.

O Quadro 8, resume as observações meteorológicas mínimas necessárias para as simulações, com o modelo CALMET são basicamente:

QUADRO 8 – OBSERVAÇÕES METEOROLÓGICAS DO CALMET.

Dados de Superfície*	A) Velocidade do vento	B) Direção do vento	C) Temperatura	D) Pressão na superfície	E) Umidade relativa
	F) Taxas de precipitação	G) Código do tipo de precipitação	H) Cobertura de nuvens	I) Altura da 1º Camada de nuvem.	
Dados de altitude (ar superior)**	A) Velocidade do vento	B) Direção do vento	C) Temperatura	D) Pressão	E) Elevação (altura)

* Observações horárias.
** Dois perfis verticais diários.

No modelo CALMET, os dados meteorológicos de superfície são inseridos no modelo por meio dos arquivos SURF.DAT e PRECIP.DAT. No primeiro arquivo são incluídos todos os dados de superfície com exceção da precipitação que é encontra-se no segundo arquivo. Os dados meteorológicos de altitude são assimilados pelo CALMET, por meio do arquivo UP.DAT.

b) Processamento dos dados meteorológicos de altitude (ar superior)

Os dados meteorológicos de altitude são obtidos de estações de radiossondagem e depois pré-processados no READ62, o qual os formata para a entrada no CALMET. Contudo, para a região estudo não existe nenhuma estação deste tipo. A estação mais próxima com uma base de dados de ar superior encontra-se no aeroporto da capital do Estado, Vitória, que está a uma distância aproximada de 70 quilômetros.

Em virtude disso, a solução encontrada para os dados de ar superior foi o uso de dados de reanálise do NCEP (*National Centers for Environmental Predction*) e NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), uma alternativa comumente usada para a obtenção de dados meteorológicos em locais com poucas informações.

O NCEP e NCAR estão cooperando num projeto (denominado "*Reanalysis*") para produzir um registro de análises globais dos campos atmosféricos para apoio às necessidades de comunidades de pesquisa e monitoramento do clima. Esse esforço envolve a recuperação de dados de superfície, terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados, controle de qualidade e assimilação dos dados, para produzir um número relativamente elevado de variáveis climáticas e meteorológicas.

O modelo é então compilado com os dados de observação e as variáveis meteorológicas determinadas são interpoladas para sistema de redes tridimensionais ou tetradimensionais com o auxílio de modelos de circulação geral, utilizados nas previsões do estado do tempo. Neste processo são produzidos dados a vários passos temporais, que vão desde uma frequência de quatro vezes por dia (de 6 em 6 horas) até aos resumos mensais (médias mensais), tendo como base o Tempo Universal (UTC).

O NCEP produziu uma segunda versão da primeira reanálise a parir do começo da era principal dos satélites, em 1979. Mais observações foram adicionadas, erros assimilados foram corrigidos e uma melhor versão do modelo utilizada.

Neste estudo foram então utilizados os dados de Reanálises 2 do NCEP-DOE disponibilizados no sitio http://nomad1.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html. Parte dos dados está dividida em 17 níveis isobáricos, porém para este trabalho foram extraídos os dados de altura geopotencial, temperatura e velocidades u e v apenas para os níveis de 1000hPa, 925hPa, 850hPa, 700hPa, 600hPa, 500hPa, 400hPa e 300hPa.

Devido ao formato em que foram obtidos esses dados, optou-se pela não utilização do pré-processador READ62, visto que este pré-processador só aceita dados nos formatos NCDC TD-6201 e NCDC CD-ROM FSL Rawinsonde. A solução adotada foi pré-formatar os dados e utilizar um código desenvolvido pelos autores em linguagem FORTRAN, para gerar o arquivo UP.DAT (arquivo de dados de ar superior) no formato aceito pelo CALMET. Antes, porém, foi necessário calcular a direção do vento pelas vetoriais da velocidade.

Ainda, para uma maior confiança nos resultados, optou por fazer um teste de sensibilidade dos resultados da modelagem com o uso de dados de altitude do aeroporto. Como os dados meteorológicos de altitude do aeroporto estavam disponíveis no formato aceito pelo READ62, então para esta simulação optou por utilizar o pré-processador. A descrição dos procedimentos adotados para esta simulação, bem como os seus resultados são detalhados no apêndice A. Observou-se que os resultados das modelagens com o uso de dados de reanálise e com o uso de dados do aeroporto pouco se diferenciaram. Contudo com os dados de reanálise, observou-se um melhor desempenho na modelagem, mesmo que pouco significativo. Assim ao final optou-se por essa base de dados.

c) Processamento dos dados meteorológicos de superfície

Para os dados de direção e velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa, precipitação pluviométrica e pressão foram utilizadas os dados da Estação do Porto do ano de 2010.

Quanto aos dados de cobertura de nuvens e altura da primeira camada de nuvens, esses não são medidos na estação do porto. Para esses dados, havia novamente a possibilidade de utilizar dados de reanálise ou dados da estação do aeroporto. Optou-se pelo teste de sensibilidade para a escolha dos dados. Como havia dito acima, observou-se que com a utilização de dados de reanálise, a modelagem apresentava melhor desempenho quando comparada aos dados observados na estação.

O código de precipitação caracteriza a precipitação pluviométrica quanto ao tipo de precipitação e a intensidade, segundo determinado formato de dados (CD144). Para a modelagem foram adotados apenas os códigos 1, 2 e 3, que indicam chuva fraca, moderada e intensa, respectivamente.

A classificação da intensidade teve como base a precipitação pluviométrica acumulada em uma hora durante os períodos de chuvas.

O pré-processador smerge aceita arquivos nos formatos NCDC-144 (SAMSON) ou NCDC CD-ROM. Para este trabalho, utilizou-se o primeiro formato. Devido a isso os dados meteorológicos de superfície foram formatados por meio de códigos escritos em linguagem FORTRAN para criar o arquivo de entrada no formato SAMSON.

Já o pré-processador pmerge assimila os dados no formato NCDC TD 3240. Contudo optou por não utilizar esse processador, devido à dificuldade de formatar os dados de entrada no formato requisitado. Assim o arquivo precip.dat (dados de precipitação) foi gerado por um código próprio de modo direto, ou seja, sem o pré-processador.

d) Processamento dos dados Geofísicos

Para os dados geofísicos, alguns dados de entrada são: dados de linha de costa, dados do terreno, dados de uso e ocupação do solo. Os dados de linha de costa são utilizados para o tratamento das inconsistências presentes na interface água/terra.

Nesta seção, será feita uma discussão a respeito da metodologia adotada nos pré-processadores de dados geofísicos.

- **TERREL**

Os dados de terreno foram extraídos e reformatados de arquivos DEM através do pré-processador TERREL. A utilização do TERREL basicamente envolve a seleção dos dados de elevação e a definição do domínio. Ainda foram utilizados dados da linha de costa com o objetivo de corrigir possíveis imperfeições.

Para a linha de costa foi utilizados os dados da GSHHS (*Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline*) que é um conjunto de dados de linha de costa de alta resolução formado a partir da combinação de duas bases de dados de domínio público: *World Data Bank II* (WDBII) e *World Vector Shoreline* (WVS).

Os dados de linha de costa podem ser utilizados para simplificar busca e seleção de dados para o domínio, como exemplo na interpolação dos dados de uso e ocupação do solo ou dados de elevação do solo.

O GSHHS versão 1.3 foi disponibilizado em 1º de Outubro de 2004 em formato binário, e pode ser obtido no link http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/data/gshhs/oldversions/version1.5/gshhs_1.3.zip. Para utilizar o GSHHS bastar localizar e selecionar os dados brutos seja no TERREL seja no CTGPROC. O nome padrão para o arquivo é gshhs_f.b. Como output é gerado um arquivo de linha de costa processado na extensão. BLN, cujo nome padrão é coast.bln. Uma vez processado em um dos pré-processadores, o arquivo BLN pode ser utilizado no outro, o que reduz significantemente o tempo de processamento. Neste estudo optou por utilizar os dados brutos no Terrel e depois entrar com o arquivo coast.bln no pré-processador CTGPROC.

Os arquivos de entrada do TERREL foram:

- A base de dados do terreno num dos formatos permitidos;
- O arquivo de controle do usuário (TERREL.INP) contendo as opções selecionadas na interface do programa.
- Arquivo de linha de costa no formato bruto (gshhs_f.b.)

Os principais dados de saída incluem:

- Arquivo do tipo lista (TERREL.LST) contendo as opções selecionadas, possíveis erros, e uma listagem da elevação do terreno em cada ponto da malha do domínio;

- Arquivo para a plotagem (TERREL.GRD) dos dados em algum software de mapeamento de superfície (*Golden Software Surfer 9*, por exemplo);
- Arquivo ASCII contendo os dados de saída da elevação do terreno (TERREL.DAT) prontos para serem usados no pré-processador MAKEGEO.
- Arquivo de resguardo (TERREL.SAV), contendo o dado de saída intermediário em formato binário;

O arquivo TERREL.GRD foi usado no software *Golden Software Surfer 9* para plotar o Gráfico tridimensional do domínio com as posições geográficas em UTM (Sistema Universal Transverso de Mercator).

- **CTGPROC**

A *U.S. Geological Survey* (USGS), a Universidade de Nebraska-Lincoln, e a *European Commission's Joint Research Centre* (JRC) geraram a Características Globais de Cobertura do Solo (GLCC). A GLCC é uma base dados global de características de cobertura de solo de 1 km de resolução para ser utilizada em diversas pesquisas ambientais e aplicação em modelagem. Esses dados são disponibilizados pela *United State Geological Survey* (USGS) no site (http://www.src.com/datasets/datasets_lulc.html).

Os dados de uso e ocupação do solo para a América do Sul utilizados no presente trabalho estão disponíveis no link http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/glcc/sa/lambert/sausgs2_0l.img.gz.

Uma vez adquiridos os dados, o pré-processador CTGPROC foi utilizado para preparar os dados para o MAKEGEO. O CTGPROC ao processar o arquivo, determina a ocupação do solo para cada célula pertencente ao domínio de estudo. Como entrada são utilizados os dados da USGS, o arquivo de controle do usuário, CTGPROC.INP e o arquivo de linha de costa formatado (COAST.BLN). Um arquivo lista (CTGPROC.LST) e um arquivo contendo os dados de ocupação do solo (LU.DAT), são criados como saída do programa.

- **MAKEGEO**

MAKEGEO é o pré-processador final dos dados geofísicos, que lê os dados de uso e ocupação do solo, a partir do arquivo LU.DAT, e os dados do terreno, a partir do TERREL.DAT. Ele também produz o arquivo GEO.DAT no formato para a entrada no CALMET.

A visualização do terreno e ocupação do solo pode ser feita através do CALVIEW após a utilização do MAKEGEO.

e) Processamento do CALMET

Para inicialização do modelo CALMET são necessários cinco arquivos principais: o arquivo de controle (CALMET.INP), onde é organizada a estrutura da simulação; o arquivo contendo a declaração dos valores dos parâmetros (PARAMSL.MET) das variáveis (lógicas, vetores, matrizes, etc.) usadas; o arquivo executável do programa (CALMETL.EXE); o arquivo contendo dados de superfície (SURF.DAT); o arquivo de dados de radiossondagem (UP.DAT). Também podem ser inseridos os arquivos de dados atmosféricos acima do oceano (SEA.DAT) e o arquivo contendo dados de precipitação (PRECIP.DAT).

Os arquivos de dados de entrada já foram discutidos em seção anterior e os arquivo de declaração de parâmetros e executável não receberam nenhum tratamento, apenas a preparação do arquivo de controle, CALMET.INP, e as explicações a ele pertinentes serão abordadas nesta seção.

Como já foi fito anteriormente, utilizou-se a interface CALPUFF GUI para gerar o arquivo de controle que define as informações da simulação, como o período de processamento, malha computacional, poluentes, etc.

Nesta etapa há vários parâmetros do cálculo da dispersão que podem ser especificados pelo usuário ou pode usar os valores padrão quando existentes. Apenas alguns foram modificados; neste caso principalmente devido às mensagens de não conformidade com a regulamentação ou para adequação a região do estudo. Como exemplo o parâmetro de Coriolis foi alterado de 0,0001 para 0,00005, pois o valor padrão é acertado para latitudes médias, enquanto a região de estudo se situa na zona intertropical, nas proximidades da latitude de 20,8º. Segundo Holton (2004) apud Silva e Sarnaglia (2010), o parâmetro de Coriolis pode ser calculado pela seguinte equação:

$$f = 2\Omega \operatorname{sen} \emptyset$$

Onde:

f: Parâmetro de Coriolis;

Ω é a velocidade angular da Terra;

∅: Latitude.

O valor de 0,00005 foi o arredondamento encontrado para cinco casas decimais.

O CALPUFF Gui permite ainda o gerenciamento de varias opções como, por exemplo, para a determinação do campo de ventos, optou por utilizar na camada mais baixa apenas os dados da estação de superfície enquanto nas camadas acima foram utilizados apenas os dados de ar superior para a interpolação do campo de ventos

Os dados de superfície, ar superior e precipitação depois de formatados, conforme já explicado anteriormente são adicionados. Apenas são necessárias a indicação da posição das estações, e a altura do anemômetro para as estações de dados meteorológicos.

E finalmente, são escolhidas as opções de saída que correspondem, basicamente a escolha do tipo do arquivo de dados gerado e seu nome, cujo padrão é ALMET.DAT e as opções de impressão no arquivo lista, por padrão CALMET.LST.

O arquivo lista gerado sumariza as opções escolhidas para a simulação, bem como eventuais mensagens de advertência e erro.

O quadro 9, mostra as entradas e saídas do processador CALMET.

QUADRO 9 - ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSADOR CALMET.

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALMET.INP	Arquivo de controle	CALMET.DAT	Arquivo de dados metereológicos e geofísicos formatado para entrada no CALPUFF. (Formato binário)
GEO.DAT	Arquivo de dados geofísicos		
SURF.DAT	Arquivo de dados de superfície	CAMET.LST	Arquivo lista.
UP.DAT	Arquivo de dados de altitude		
PRECIP.DAT	Arquivo de dados de precip.dat		

Fonte: Adaptado de SILVA e SARNAGLIA, 2010.

O arquivo CALMET (CALMET.DAT) contém todos os dados meteorológicos e geofísicos do domínio computacional em formato binário, que pode ser pós-processada utilizando o programa PRTMET, possibilitando assim a sua visualização.

f) PRTMET

PRTMET é um programa de pós-processamento do CALMET incluso na via interface gráfica (PRTMET GUI). O programa PRTMET necessita de quatro arquivos para promover o processamento: o arquivo de controle (PRTMET.INP); arquivo contendo a declaração dos valores dos parâmetros (PRTMET.PMT) das variáveis; o arquivo executável do programa (PRTMET.EXE) e o arquivo de saída do modelo CALMET (CALMET.DAT), que contém os dados meteorológicos e geofísicos na região do domínio computacional, e que serão processados.

Na preparação do arquivo de controle podem ser escolhidas as saídas, que são diversas para o arquivo lista e para a criação de *plots*, que podem ser empregados como arquivos de entrada para geração de gráficos. Entre essas opções destaca: altura da camada de mistura, taxa de precipitação, estabilidade atmosférica. Ainda podem ser criados *plots* tridimensionais para cada camada da temperatura e velocidade dos ventos. Os arquivos de saída são PRTMET.LST que sumariza as opções escolhidas para a simulação bem como eventuais mensagens de advertência e erro e os arquivos com os dados de saída selecionados

6.4.2. CALPUFF

Para compilar o modelo CALPUFF necessita de quatro arquivos essenciais: o arquivo de controle (CALPUFF.INP); o arquivo contendo a declaração dos valores dos parâmetros (PARAMS.PUF) das variáveis usadas; o arquivo executável do programa (CALPUFF.EXE); o arquivo de dados meteorológicos (CALMET.DAT).

Novamente foi utilizada a interface CALPUFF GUI para gerar o arquivo de controle. O período de processamento utilizado no CALPUFF foi o mesmo adotado no CALMET. Os parâmetros referentes aos poluentes, como média geométrica do diâmetro, por exemplo, foram mantidos com os valores padrões disponibilizados pelo CALPUFF.

Não foram consideradas transformações químicas neste estudo, logo esse campo não foi utilizado. Entretanto foi utilizada deposição úmida e seca. Os parâmetros para a deposição úmida e seca foram mantidos os mesmos.

Na etapa seguinte são inseridos os dados relativos às fontes. No estudo foram escolhidas as opções de fonte de linha e volume para representação das fontes industriais e fontes de área para representação das vias.

Os parâmetros de entrada das fontes pontuais no modelo CALPUFF são:

- Identificação da fonte (até seis dígitos);
- Coordenadas em UTM da fonte em quilômetros;
- Altura efetiva da fonte em relação ao solo em metros;
- A elevação do solo em relação ao nível do mar em metros;
- Diâmetro da fonte em metros;
- Velocidade de saída da pluma em metros por segundos;
- Temperatura de saída em Kelvins;
- Presença de estruturas próximas à fonte (não utilizado neste estudo);
- Dimensões iniciais da pluma (σy_0 e σz_0) em metros (não utilizado neste estudo);
- Fluxo de momento vertical (0 ou 1);
- Altura da plataforma em mAGL (não utilizado neste estudo);
- Taxa de emissão do poluente (adotada g/s);
- Variação temporal da emissão (não utilizado neste estudo).

O fluxo de momento vertical recebe os valores lógicos 0 ou 1. Onde 0 representa a ausência de fluxo de momento vertical e 1 representa fluxo de momento vertical total. Deve-se usar 0 apenas quando existe algum obstáculo na saída da chaminé (chapéu de proteção contra a chuva, por exemplo). Como essa informação não estava disponível, foi considerado fluxo de movimento vertical total para todas as fontes pontuais.

Os dados de entrada para a modelagem de fontes de área no CALPUFF são:

- Identificação da fonte (até seis dígitos);
- Coordenadas em UTM dos quatro pontos que formam o polígono que representa a fonte em quilômetros;
- Altura efetiva da fonte em relação ao solo em metros;
- A elevação do solo em relação ao nível do mar em metros;
- Taxa de emissão do poluente (adotada Kg/hr.m^2);
- Dimensão vertical inicial (σz_0) em metros;
- Variação temporal da emissão.

Os dados de entrada para a modelagem de fontes volumétricas no CALPUFF são:

- Identificação da fonte (até seis dígitos);
- Coordenadas em UTM do centro do volume em quilômetros;
- Altura efetiva da fonte em relação ao solo em metros;

- A elevação do solo em relação ao nível do mar em metros;
- Taxa de emissão do poluente (adotada g/s);
- Dimensões iniciais da pluma (σy_0 e σz_0) em metros;
- Variação temporal da emissão (não utilizado neste estudo).

Tais informações foram inseridas diretamente no arquivo de inicialização CALPUFF.INP, sem o auxílio da interface CALPUFF Gui. Para isso, executou-se a simulação sem fontes e no CALPUFF.INP foram inseridos os dados das fontes formatados em uma rotina escrita em linguagem FORTRAN.

Além da região do domínio computacional, também foram inseridos 4 (quatro) pontos discretos à malha equivalentes a localização das estações de monitoramento de qualidade do ar, com o objetivo de se obter dados de concentração estimados nestes pontos para posterior comparação. Por fim, selecionar os arquivos de saídas.

Uma vez processado o modelo, são gerados um arquivo que sumariza as opções escolhidas para a simulação (CALPUFF.LST), bem como eventuais mensagens de advertência e erro na simulação e um arquivo contendo as concentrações dos poluentes nas médias de tempo e unidades selecionadas para os receptores ativados na modelagem (CONC.DAT).

O Quadro 10 mostra as entradas e saídas do CALPUFF.

QUADRO 10 - ENTRADAS E SAÍDAS DO PROCESSADOR CALPUFF.

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALPUFF.INP	Arquivo de controle	CONC.DAT	Arquivo de dados de concentração formatado para entrada no CALSUM e depois no CLAPOST. (Formato binário)
CALMET.DAT	Arquivo de dados geofísicos e meteorológicos.	CALPUFF.LST	Arquivo lista.

Fonte: Adaptado de SILVA e SARNAGLIA, 2010.

6.4.3. CALSUM

O CALSUM é um pós-processador que cuja função é juntar vários arquivos de dados de concentração em apenas um para pós-processamento no CALPOST. Esse processador não está incluída na interface gráfica. Os arquivos de entrada incluem o CALSUM.INP, que contém as informações de controle e os arquivos de dados de concentração. Como saída, ele

gera um arquivo com os dados da concentração total e um arquivo lista (CALSUM.LST) indicando as opções selecionadas e possíveis erros. O arquivo executável recebe o nome de CALSUM.EXE e o arquivo com os parâmetros das variáveis usadas na simulação recebe o nome de PARAMS.SUM.

Uma amostra do arquivo de controle do CALSUM acompanha o arquivo executável. O *download* do CALSUM deve ser feito no seguinte sítio: http://www.src.com/CALPUFF/download/mod6_codes.htm.

O Quadro 11 mostra as entradas e saídas deste processador.

QUADRO 11 - ENTRADAS E SAÍDAS DO PÓS - PROCESSADOR CALSUM.

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CONC1.DAT	Arquivo de dados de concentração da simulação 1	CONC_T.DAT	Arquivo de dados de concentração total das diferentes simulações.
CONC2.DAT	Arquivo de dados de concentração da simulação 2	CALSUM.LST	Arquivo lista.
...	**...**		
CONCn.DAT	Arquivo de dados de concentração da simulação n		

Fonte: Adaptado de SILVA e SARNAGLIA, 2010.

6.4.4. CALPOST

O programa CALPOST, diferente do CALSUM está incluído na via interface gráfica CALPOST GUI. O programa necessita de quatro arquivos para promover o processamento: o arquivo de controle (CALPOST.INP), onde é organizada a estrutura da simulação; o arquivo contendo a declaração dos valores dos parâmetros (PARAMS.PST) das variáveis; o arquivo executável do programa (CALPOST.EXE) e o arquivo de saída do pós-processador CALSUM (CONC_T.DAT). Os arquivos de saída contêm as concentrações dos poluentes simuladas nos receptores ativados para modelagem e o arquivo (CALPOST.LST) que sumariza as opções escolhidas para a simulação bem como eventuais mensagens de advertência e erro na simulação.

No CALPOST, o usuário tem diversas opções para o formato dos dados do arquivo de saída. Pode-se escolher o poluente desejado a ser impresso (caso a modelagem envolva mais de um poluente), a unidade para a concentração, as médias de tempo (1 hora, 24 horas, anual ou a média do período de processamento), a impressão das quatro maiores concentrações para cada

ponto da malha ou as 50 maiores concentrações de todo o domínio e varias outras opções. Ainda podem ser escolhidos os receptores para os quais serão exibidas as concentrações, sejam eles os receptores da malha ou os receptores discretos

Quanto ao formato do arquivo, pode-se escolher a extensões .dat ou grd. O último formato permite a visualização direta em um programa de reprodução gráfica, como o Surfer Golden versão 9.0, que foi o programa utilizado neste trabalho.

O programa da interface CALPUFF GUI ainda possui o programa CALVIEW que pode ser utilizado para a visualização gráfica dos resultados da modelagem.

O Quadro 12 mostra as entradas e saídas deste processador.

QUADRO 12 - ENTRADAS E SAÍDAS DO PÓS - PROCESSADOR CALPOST

Arquivos de entrada		**Arquivos de saída**	
CALPOST.INP	Arquivo de controle	PLOTS.GRD	Arquivo de dados de concentração no formato grid
CONC.DAT	Arquivo de dados de concentração	RANK.DAT	Arquivo de dados das maiores concentrações
		TIMESERIE.DAT	Arquivo de dados das concentrações para um intervalo de tempo selecionado.
		CALPOST.LST	Arquivo lista.

Fonte: Adaptado de SILVA e SARNAGLIA, 2010.

6.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Por causa das limitações dos modelos gaussianos, como não considerar a mudança de direção e intensidade do vento e basear-se em parâmetros empíricos como rugosidade do solo, o erro associado a eles está em uma faixa de 50%, segundo ARYA (1999) apud VICENTINI (2011). Portanto as concentrações previstas possuem uma grande amplitude de variação. Assim, como a EPA não tem recomendações segundo esses parâmetros, apenas em relação a 90% dos dados meteorológicos terem que ser considerados, para o modelo ser aceito para fins regulatórios.

Por isso utiliza-se de meios estatísticos para avaliar a qualidade da modelagem matemática, a partir de parâmetros que serão especificados abaixo.

- Média Aritmética e Desvio Padrão:

A média aritmética é uma ferramenta para saber se a concentração média calculada é próxima da concentração média medida. Seu cálculo foi utilizado nas médias horárias e médias de 24h, e sua fórmula segue abaixo:

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^N x_i}{N}$$

O desvio padrão indica o grau de dispersão dos valores em relação à média, e é calculado a partir de:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_1^N (x_i - \bar{x})}}{\sqrt{N-1}}$$

Em que:

$\bar{x}$: Média aritmética dos valores de x;
σ: Desvio padrão;
x: Representa os dados de concentração;
N: Número de medições realizadas no ano.

- Coeficiente de Correlação (COR):

  Este cálculo estatístico determina a relação linear entre duas variáveis, como no caso do presente trabalho, entre os valores estimados e os medidos. Seu valor varia entre -1 e 1, e é um valor adimensional. Seu cálculo é realizado da forma seguinte:

$$COR = \frac{\sum_1^N [(x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{[\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2][(Y_i - \bar{Y})^2]}}$$

  Sendo:

  COR: Coeficiente de Correlação;

  X: Concentração estimada;

  Y: Concentração medida;

  N: Número de medições realizadas no ano.

- Vicio Desvio Fracional, *Robust Highest Concentration*:

  O cálculo do vício mostra o erro médio entre os dados estimados e os dados medidos, sendo calculado pela seguinte fórmula:

$$Vicio = \frac{\sum_1^N (x_i - y_i)}{N}$$

Em que:

X: Concentração estimada;

Y: Concentração medida;

N: Número de medições realizadas no ano.

A importância deste cálculo se deve pela importância de dados de comparação para dados futuros.

Para medida de desempenho do modelo recomendada pela EPA, segundo RADJONIC e GARISTO (2004), é a FB, sendo calculada como:

$$FB = \frac{(ES - ME)}{(ES + ME)}$$

Onde:

ES, ME: Médias dos 25 maiores valores estimados e medidos, respectivamente.

O valor deste parâmetro varia entre -2 (subestimação extrema) e 2 (superestimação extrema), e quanto mais próximo de zero mais livre de desvio está a modelagem.

O *Robust Highest Concentration* (RHC) representa a estimativa das mais altas concentrações baseadas em uma curva exponencial para a distribuição de concentração. Seu cálculo pode ser descrito como:

$$RHC = x_n + (x - x_n) ln\left(\frac{3n - 1}{2}\right)$$

Sendo:

n: Número de valores usados para caracterizar as mais altas concentrações, assumindo n =26 (COX e TIKVART, 1990)

x_n: Enésimo maior valor;

n: Média dos n-1 maiores valores

Esse cálculo é importante para avaliar a influência de atividades não usuais, tendo em vista que um modelo regulatório necessita de ser o mais próximo do real possível, podendo ser realizado uma comparação entre o valor dos dados medidos e calculado, para a avaliação do modelo.

- Fator de Dois:

  Cálculo do percentual de resultados simulados que se encontram dentro de um erro de até 100% em relação aos resultados obtidos, e seu valor ótimo é 1. Assim, quanto mais próximo desse valor, melhor os resultados.

- Erro Quadrático Médio:

  Esse valor indica os desvios gerais entre os valores estimados e medidos. Ao contrário do Vício, o Erro quadrático médio os desvios são somados e, por isso, mostra as diferenças mais acentuadas entre as séries medida e estimada. Se o valor encontrado é pequeno, indica que o desempenho é bom no tempo e no espaço. Seu cálculo é:

$$NMSE = \frac{1}{N}\sum_{1}^{N} \frac{(ES_i - ME_i)^2}{\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{1}^{N} ES_i\right)\left(\frac{1}{N}\sum_{1}^{N} ME_i\right)\right]}$$

  Sendo:

  ES, ME: Valores estimados e medidos, respectivamente;

  N: Número dos trabalhos medidos

7. RESULTADO E DISCUSSÕES

Este capítulo expõe os resultados obtidos e discussões a eles pertinentes em duas seções. Na primeira é feita a análise da influência das fontes móveis e estacionárias na qualidade do ar da Região de Anchieta, além da verificação de atendimento a legislação CONAMA e diretrizes da OMS. Na segunda seção é apresentada a avaliação do modelo utilizado através das ferramentas estatísticas abordadas na seção anterior.

7.1. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

A) Resultados do AERMOD

As Figuras 33 e 34 apresentam, respectivamente, a distribuição das concentrações máximas médias de 24 horas e das concentrações médias anual de PM10 na região de estudo, durante o ano de 2010, usando o modelo AERMOD.

- Média de 24 horas

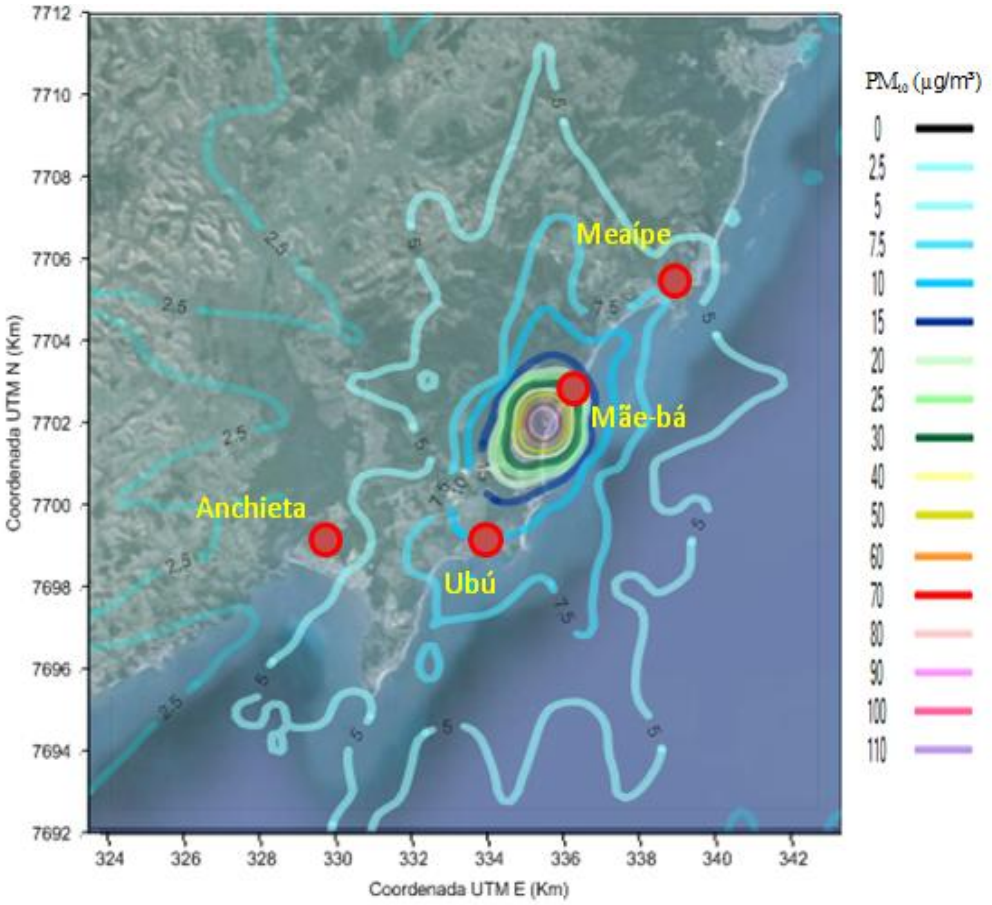


FIGURA 33 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM10 EM 2010, USANDO AERMOD

Na Figura 33, observa-se que a maior concentração máxima média diária no domínio é de 121 µg/m³ e essa se encontra sobre o empreendimento da Samarco. Portanto, em nenhum ponto do domínio, o valor da concentração ultrapassa o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90 para a média de 24 horas de PM_{10}, que é de 150 µg/m³. Além da região da Samarco, observam-se altas concentrações sobre a comunidade de Mãe-bá, o que já era esperado tendo em vista a sua proximidade com o empreendimento. A concentração que chega a comunidade de Ubú é de 9,8 µg/m³, enquanto que na comunidade de Meaípe, a concentração varia entre 5 µg/m³ e 7,5 µg/m³. Em Anchieta, que está a uma distância aproximada de 7Km da Samarco, a concentração chega a menos que 5 µg/m³.

- Média Anual

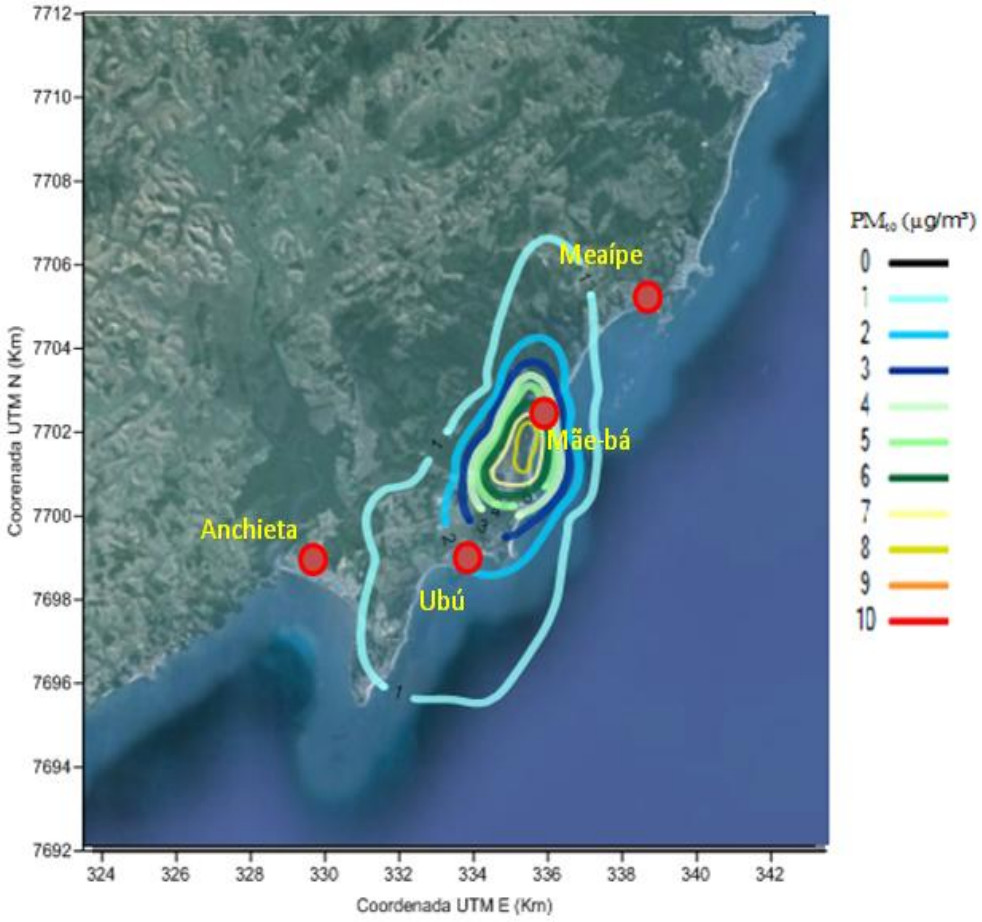


FIGURA 34 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA ANUAL DE PM_{10} EM 2010, USANDO AERMOD.

A Figura 34 indica que o Padrão de Qualidade do Ar previstos na CONAMA 03/90 para a média anual de PM_{10} não foi ultrapassado em nenhum momento, tendo sua concentração máxima de 9,42 µg/m³.

B) Resultados do CALPUFF

As Figura 35 e 36 apresentam, respectivamente, a distribuição das concentrações máximas médias de 24 horas e a média anual da concentração de PM10 na região de estudo durante o ano de 2010, usando o modelo CALPUFF.

- Média de 24 horas.

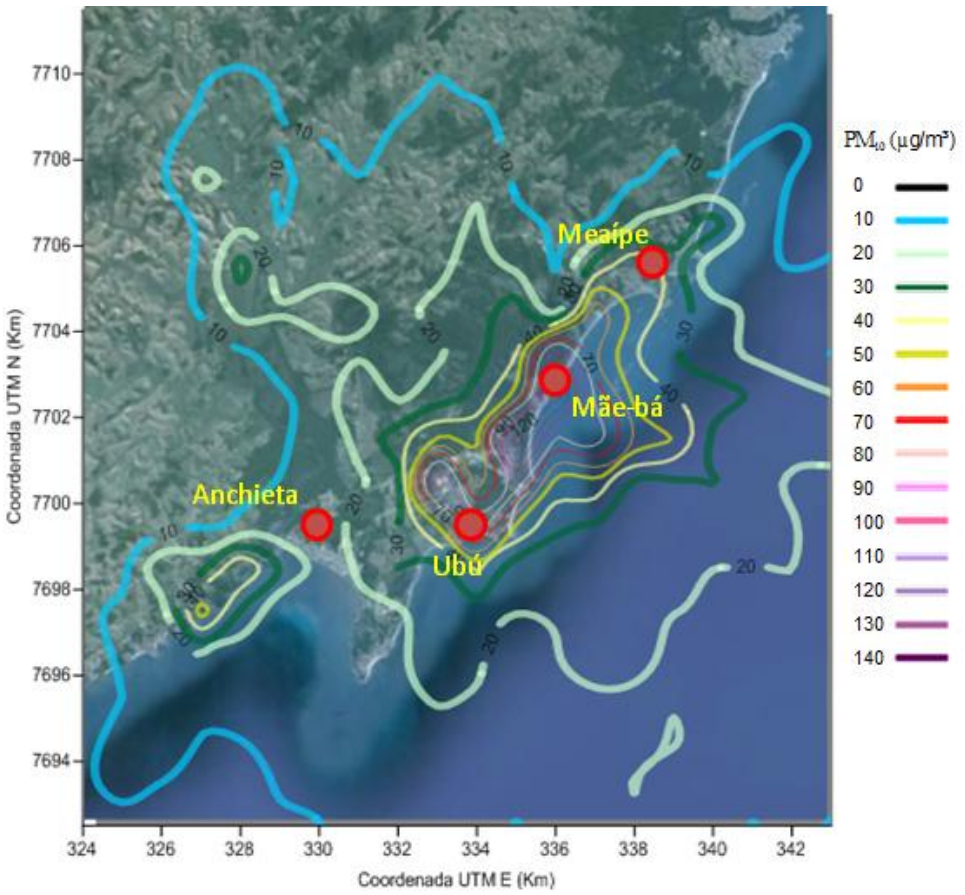


FIGURA 35 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} EM 2010, USANDO CALPUFF.

Assim como no modelo AERMOD, a Figura 35 indica que o Padrão de Qualidade do Ar previstos na resolução CONAMA 03/90 para a média de 24 horas de PM_{10} não foi ultrapassado em nenhum momento, porém apresentou resultados mais próximos do limite, tendo sua concentração máxima o valor de 140,23 µg/m³ na área da Samarco. Na comunidade de Mãe-Bá as concentrações máximas médias calculadas foram aproximadamente 90 µg/m³. Já na cidade de Anchieta as concentrações máximas médias calculadas estão entre 15 µg/m³ e 20 µg/m³, enquanto em Ubú se encontram entre 60 µg/m³ e 70 µg/m³.

- Média Anual:

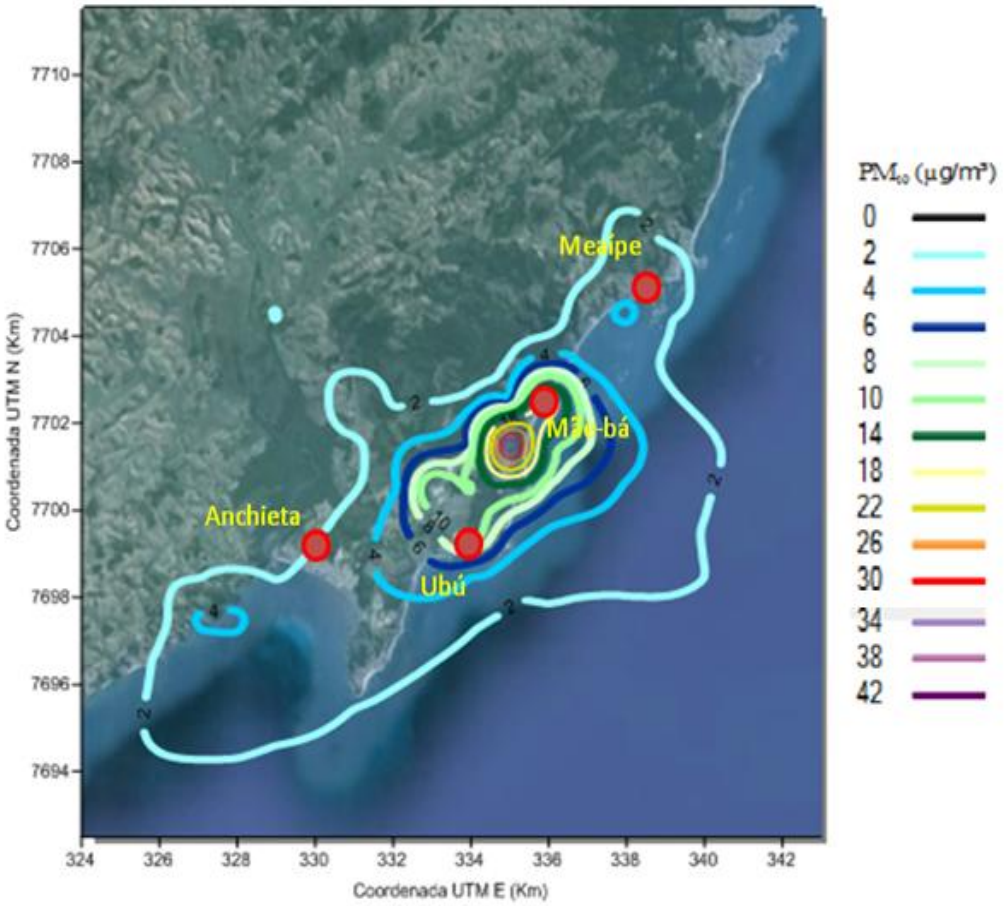


FIGURA 36 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA ANUAL DE PM_{10} EM 2010, USANDO CALPUFF.

Na Figura 36 pode ser observado que o Padrão de Qualidade do Ar previstos na Resolução CONAMA 03/90 não foi ultrapassado em nenhum momento, e sua concentração máxima calculada possui o valor de 42,47 µg/m³. As médias anuais para as comunidades de Mãe-bá e Ubú variam de 10 a 14 µg/m³, já para cidade de Meaípe, a média anual varia de 2 a 4 µg/m³. E a média anual em Anchieta está próxima de 2 µg/m³. Os valores máximos em ambos os modelos foram encontrados próximo ao centro da malha, onde se encontra a Samarco.

Comparando os resultados das modelagens com AERMOD e CALPUFF, verifica-se que usando o primeiro modelo, as concentrações de PM_{10} nas suas médias de 24 horas e anual, foram significativamente menores que os valores encontrados usando o modelo CALPUFF.

7.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

No presente estudo foi realizado um teste de sensibilidade a partir dos parâmetros estatísticos acima descritos para a definição de qual modelo apresentou melhores resultados em comparação aos dados de qualidade do ar das estações de Mãe-bá e Ubú.

- **Análise dos dados de monitoramento de PM10 nas estações de qualidade do ar:**
  Porcentagem dos dados observacionais diários de PM10, durante o ano de 2010, para a Estação de Mãe-bá é de 23,3% (85 dados) e para a Estação de Ubú é de 91,2% (333 dados).

- **Análise dos resultados da modelagem:**
  Os indicadores estatísticos da comparação entre os resultados da modelagem do CALPUFF e AERMOD com o dados do monitoramento de qualidade do ar são apresentados na Tabela 2 que se encontra na próxima página.

Observa-se na Tabela 4 que os fatores de correlação encontrados para os dois modelos encontram-se abaixo do esperado se comparados aos valores obtidos por Soares (2010) e Silva e Sarnaglia (2010) que são respectivamente 0,36 e 0,08 para o CALPUFF e 0,58 para o AERMOD. A estação Ubú que apresentou o melhor índice de correlação para ambos os modelos com os valores de 0.05 e 0,04 para o CALPUFF e o AERMOD, respectivamente.

Ao analisar o parâmetro vício, observa-se que em todos os casos deram negativo, o que indica a subestimação das concentrações do poluente pelos modelos. O valor de 2.23 $\mu g/m^3$ foi encontrado por Silva e Sarnaglia (2010), no entanto, a comparação entre estudos realizados em diferentes áreas não é aplicável.

Os parâmetros RHC e FB são usados para comparar as maiores concentrações previstas e medidas. Valores maiores que um para a razão RHC e maiores que zero para FB indicam sobrepredições e quando são menores que um e menores que zero, respectivamente indicam subpredições para as maiores concentrações. Observa-se que nas duas estações para ambas as modelagens, CALPUFF e AERMOD, os resultados dos índices FB e RHC indicam a subestimação das maiores concentrações. Em relação aos valores obtidos para os indíces FA2 e EMQN**,** nota-se que o desempenho do CALPUFF foi melhor que do AERMOD para ambas as estações. Verifica-se que o resultado obtido com o CALPUFF para a estação de Ubú, está próximo do valor encontrado por Soares (2010), com o valor de 0,33.

TABELA 4- COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES ESTATÍSTICOS ENTRE AERMOD E CALPUFF E REFERÊNCIAS.

Índices estatísticos	Estações com medição de PM10				Referências			Valor ótimo
	Ubú		Mãe-bá		SOARES, 2010		SILVA e SARNAGLIA, 2010	
	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[1]	8.52 ± 8.40	0.30 ±8.52	6.74 ± 7.65	0.55 ± 0.29	NA	NA	NA	NA
Coeficiente de Correlação (COR)	0.05	0.04	-0.06	-0.02	0,36	0,58	0.08	1
Vício (µg/m³)	-19.58	-27.88	-18.74	-25.17	-	-	2.23	0
RHCES/RHCME	0.59	0.02	0.82	0.03	-	-	1.74	1
Desvio Fracional (FB)	-0.67	-1.92	-0.25	-1.87	0,9	-0,07	0.53	0
Fator de dois (FA2)	0.36	0.01	0.35	0.02	0,33	0,74	1	1
Erro Médio Quadrático Normalizado (EMQN)	2.56	113.59	3.58	58.36	1,98	0,43	0.28	0
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[2]	28.19 ± 15.57		25.64 ± 14.1		NA	NA	NA	NA

1. Média da Concentração Prevista 2. Média da Concentração Observada NA. Não aplicado à Comparação.

Na Figura 37 é apresentado um gráfico do tipo QuantilxQuantil (QxQ) para as médias de 24 horas de PM10 na estação de Ubú. Esse tipo de gráfico é preparado a partir da plotagem dos dados estimados contra os dados medidos, as concentrações estimadas e medidas são colocadas em ordem crescente e pareadas independentemente de tempo ou espaço. Segundo NIST/SEMATECH (2010) apud Silva e Sarnaglia (2010), o QxQ é uma técnica gráfica para determinar se duas séries de dados possuem distribuição comum. A linha de 45° de referência é plotada e se as duas séries possuem a mesma distribuição os pontos devem se aproximar dessa linha. Ou seja, em gráficos QxQ um bom modelo terá uma inclinação similar a de uma linha 1:1 e, especificamente para aplicações regulatórias, terá os maiores valores da estimativa próximos aos valores medidos (SILVA E SARNAGLIA, 2010). Os resultados ainda foram avaliados por um fator de dois, de modo que analisa se as concentrações previstas estavam dentro da faixa delimitada pela metade e o dobro das concentrações observadas na estação. Observa-se no gráfico abaixo, que apenas as maiores concentrações modeladas pelo CALPUFF são, em alguns pontos, superiores a metade das concentrações medidas.

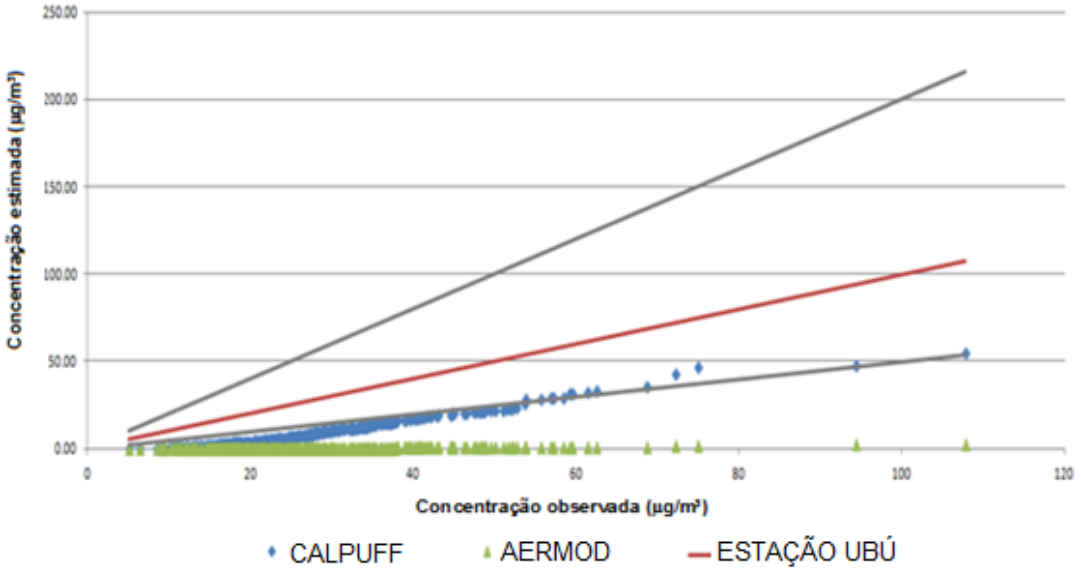


Figura 37 - Análise dos resultados obtidos para o AERMOD e CALPUFF em relação aos valores medidos.

7.3. OUTROS RESULTADOS

Como o modelo CALPUFF apresentou melhor desempenho que o modelo AERMOD, assim como foi observado na seção anterior, então a presente seção apresentará outras análises obtidas com esse modelo. Primeiramente será analisada a contribuição das fontes industriais, consideradas no inventário, para a concentração total prevista. Em

seguida será analisada a qualidade do ar na região segundo os limites do IQA para PM10. Ainda, foi avaliada a qualidade do ar da região pelo poluente PTS, usando o modelo CALPUFF que apresentou melhor desempenho do que o AERMOD. Outras análises que também foram consideradas relevantes durante o estudo, como a análise da qualidade do ar segundo as recomendações da OMS, são abordadas nos apêndices.

Na Figura 38 são apresentadas as concentrações máximas médias de 24horas de PM_{10} previstas considerando apenas as fontes industriais na simulação.

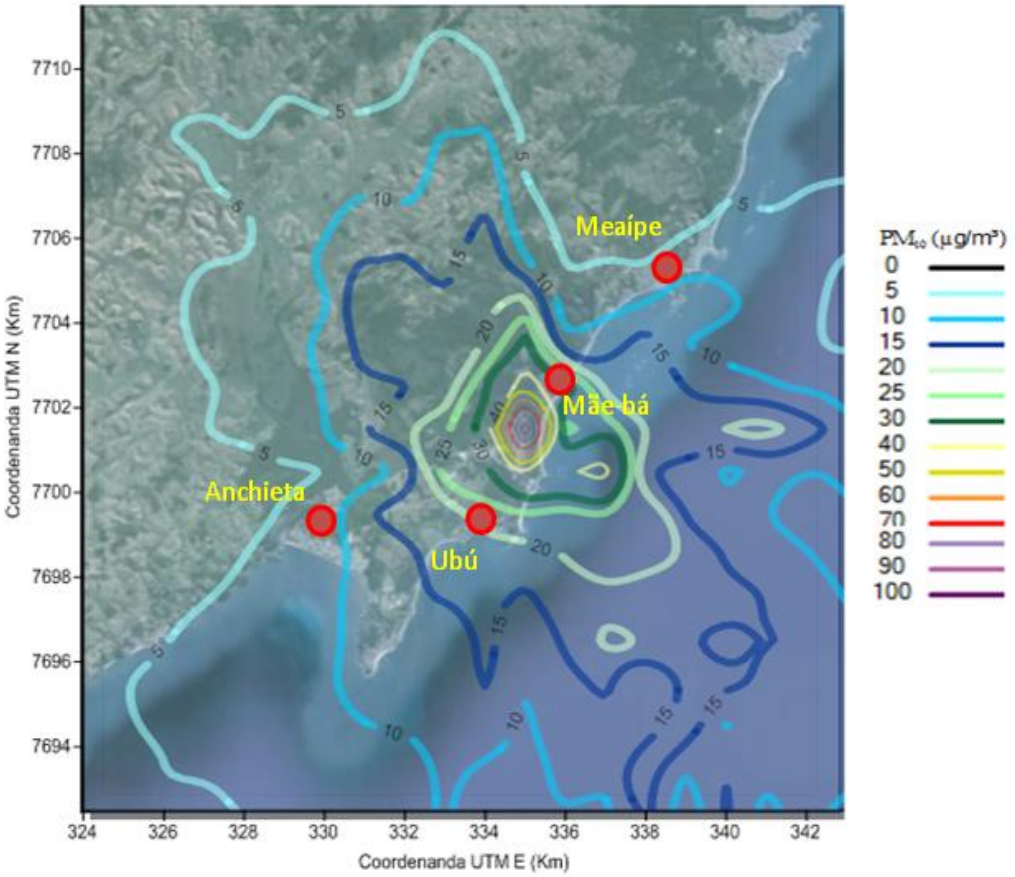


FIGURA 38 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} PARA AS FONTES INDUSTRIAIS

A partir da comparação da Figura 38 com a Figura 35 pode-se observar que as vias de tráfego interferem significativamente na qualidade do ar da região, tendo em vista que os valores máximos médios da Figura 35 (Fontes industriais e móveis) são superiores aos valores do gráfico da Figura 38. Nota-se ainda que há uma superestimativa das concentrações em alguns trechos das vias simuladas no modelo. Observou que este evento ocorreu nos trechos mais longos, ou seja, nos trechos onde havia uma menor proporção entre a largura e o comprimento dos polígonos usado para representá-los.

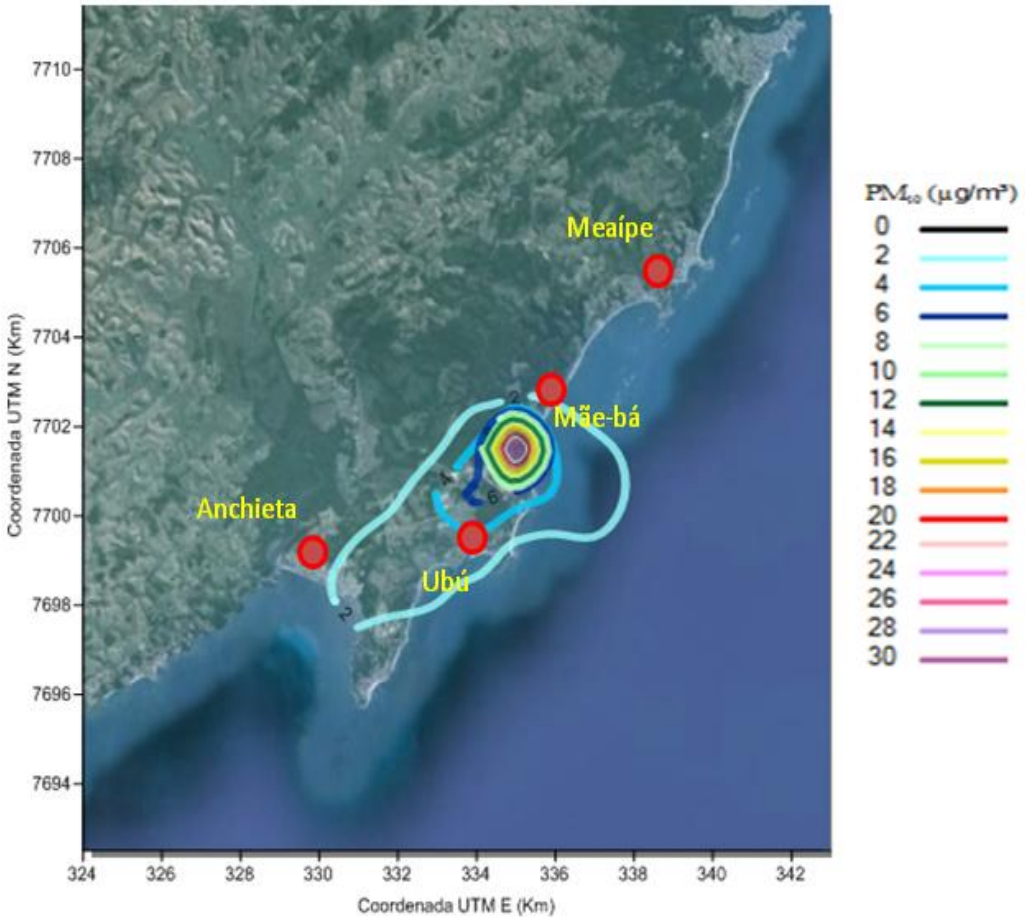


FIGURA 39 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS ANUAIS DE PM_{10} PARA AS FONTES INDUSTRIAIS.

Tanto na Figura 39 quanto na Figura 36, podem-se observar valores baixos para as médias anuais, porém as dimensões da pluma são superiores na Figura 36, tendo em vista a presença de vias de tráfico distribuídas ao longo do domínio.

As Figuras 40 e 41 apresentam a dispersão do PTS na região estudada, para as médias de 24 horas e anual.

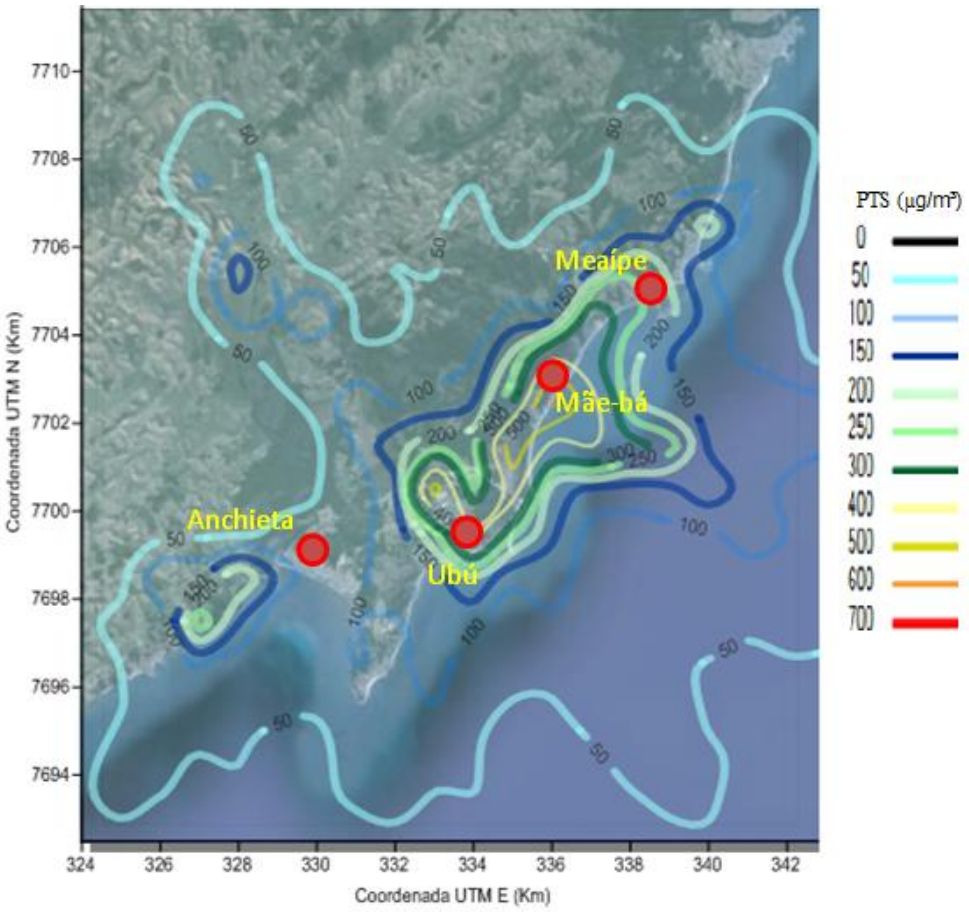


Figura 40 – Concentrações Máximas Médias de 24h para PTS

Pode-se observar na Figura 40, que o padrão de qualidade do ar presente na CONAMA é ultrapassado na área do empreendimento, nas cidades de Anchieta e nas comunidades de Mãe-bá e Ubú, estando abaixo do limite apenas em Guarapari, que se encontra a aproximadamente 8Km de distância da Samarco. A Figura 41 apresenta as concentrações médias anuais de PTS na região.

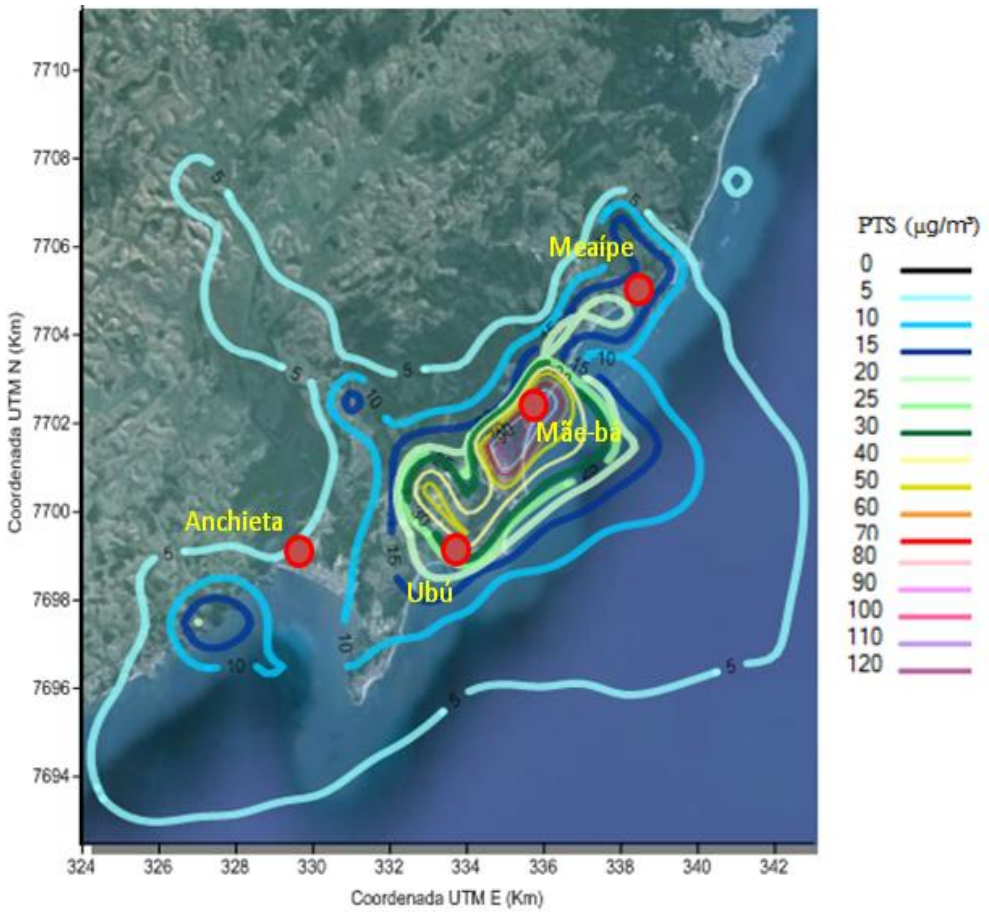


FIGURA 41- CONCENTRAÇÕES MÉDIAS ANUAIS DE PTS

Para as concentrações médias anuais calculadas para a região de estudo foi observado à qualidade do ar superior ao padrão CONAMA na região do empreendimento da Samarco e nas comunidades de Mãe-bá. Lembrando que o padrão de PTS para a média de 24 horas é de 240 µg/m³.

As Figuras 42 e 43 apresentam a classificação da qualidade do ar na região em relação ao IQA, calculado a partir das médias móveis de 24 horas de PM_{10} e PTS, respectivamente.

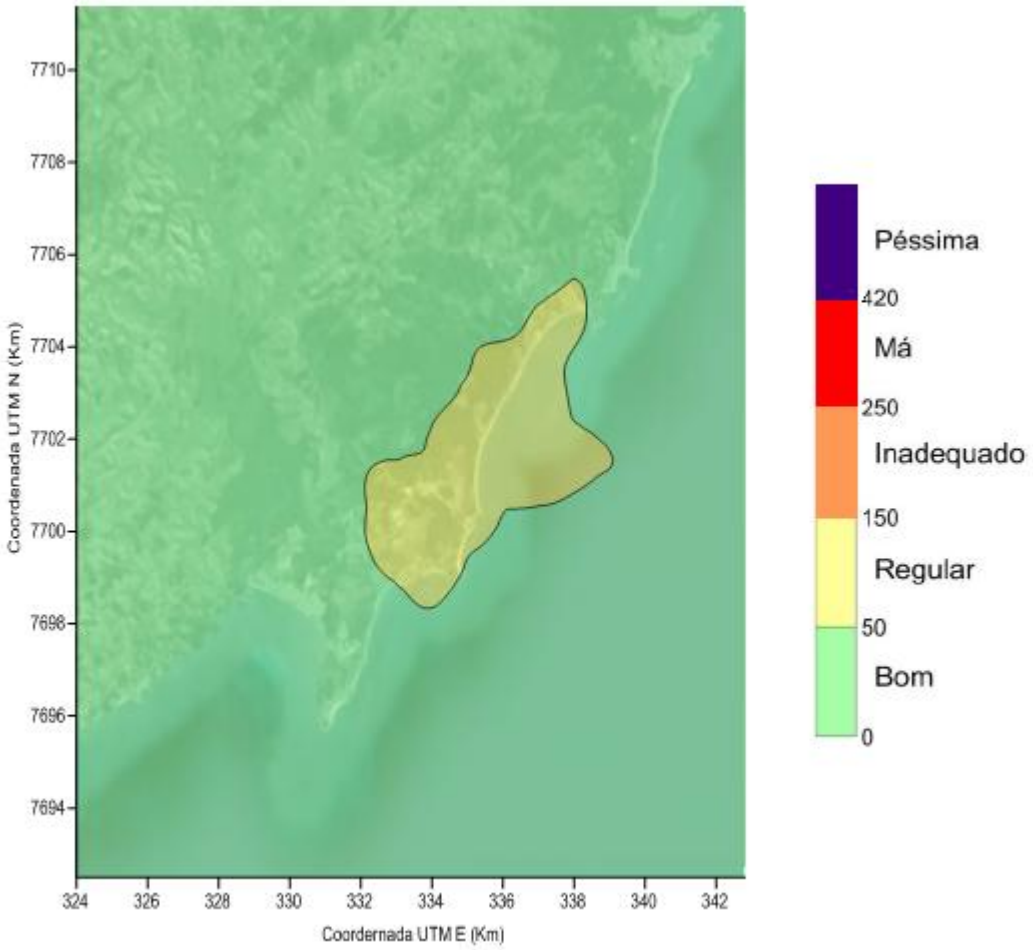


Figura 42 - Classificação da região de estudo segundo o IQA considerando o poluente PM10.

Pode-se observar que apesar de dela ser considerada “Regular” na região do empreendimento da Samarco e nas comunidades de Mãe-Bá e Ubú, em todo o resto do domínio definido para estudo a qualidade do ar é considerada “Boa”.

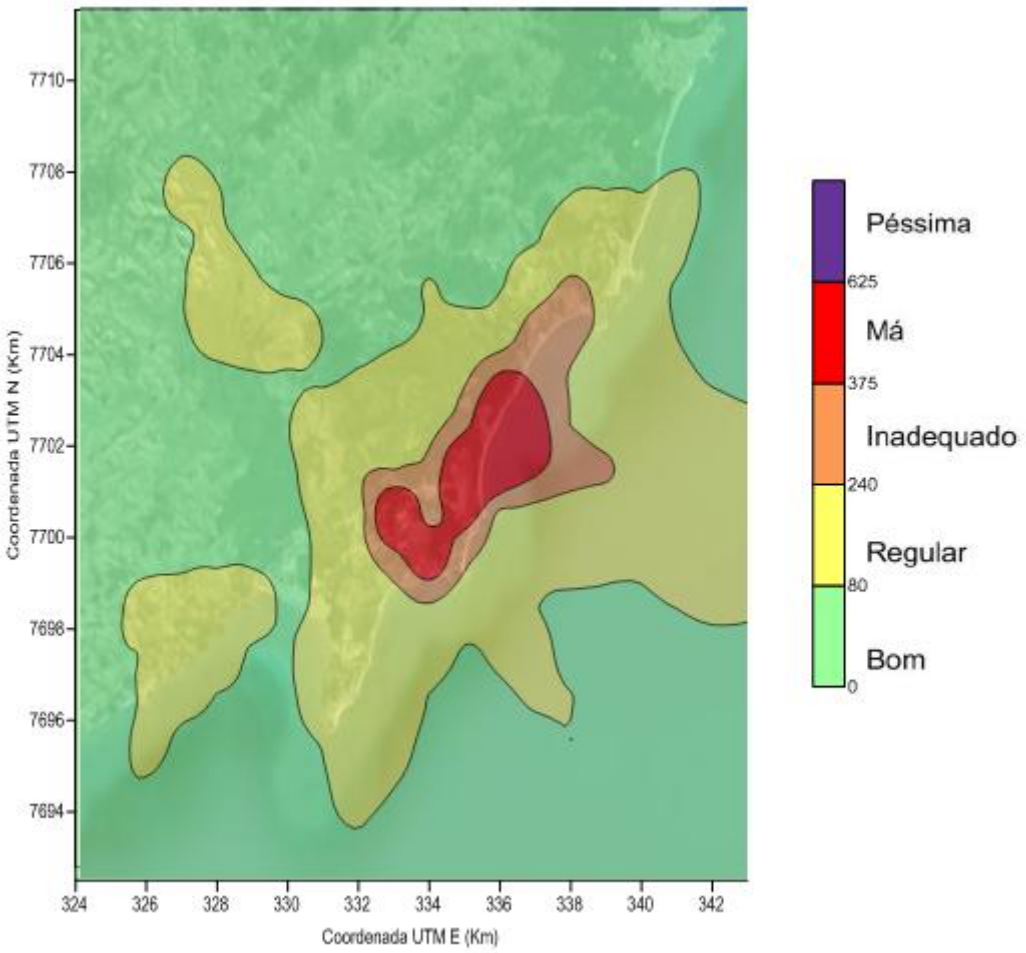


Figura 43 - Classificação da região de estudo segundo o IQA considerando o poluente PTS.

Na Figura 43 pode-se observar que em relação ao PTS a região apresenta uma qualidade "Má" na região do empreendimento da Samarco e nas comunidades de Mãe-bá e Ubú, enquanto que em Guarapari tem sua classificação entre "Regular" e "Inadequada", dependendo da distância da Samarco. Vale lembrar que este índice é calculado a partir das médias móveis de 24 horas de PTS.

8. CONCLUSÕES

No presente estudo foram utilizados os modelos regulatórios sugeridos pela EPA (2004), AERMOD e CALPUFF para análise da qualidade do ar da região de Anchieta. Os dados utilizados foram o inventário de fontes da empresa Samarco S.A., fornecida pelo IEMA, além das vias de tráfego, cujos valores presentes no Estudo de Impacto Ambiental da Samarco foram considerados no inventário de fontes utilizado na modelagem. Os dados meteorológicos do ano de 2010 foram cedidos também pelo IEMA, para as estações de Ubú e Mãe-bá, próximas ao empreendimento. Os dados de superfície foram retirados do site da USGS, de forma gratuita. Para os dados de *Upperair*, necessários para a modelagem no modelo CALPUFF foi necessária a formatação dos dados de reanálise, disponíveis aos usuários pela internet. Os modelos apresentaram também uma consideração do relevo nos cálculos, que pôde ser observado nos resultados das concentrações nos pontos da malha próximos às altitudes elevadas.

Na análise de fontes disponíveis para a realização do trabalho, foram consideradas as fontes industriais e móveis, sendo a última representada pelas vias de trafego na região. Apesar da frota de veículos na região ainda apresentar baixo número de automóveis em relação à Grande Vitória, observa-se uma significativa influência destas fontes na qualidade do ar da região.

Os resultados obtidos em ambos os modelos mostram que os limites de qualidade do ar previstos na Resolução CONAMA 03/90 não foram ultrapassados, embora na modelagem com o CALPUFF, os resultados mostram que apesar do padrão não ter sido atingido, as médias das concentrações chegaram próximo do limite, sendo preocupante a expansão e implementação de indústrias na região. As maiores concentrações foram observadas onde se localiza a Samarco. As comunidades de Mãe-bá e Ubú, mais próximas ao empreendimento são as que apresentam os maiores valores de concentração calculados e medidos. É importante lembrar que apesar da modelagem não apresentar valores superiores à CONAMA 03/90, se considerados os limites do IQA, algumas regiões têm a qualidade do ar consideradas “Boa” ou “Regular”.

Quanto à acurácia dos dados calculados, pode-se observar no capítulo de análises estatísticas que o CALPUFF apresentou melhores resultados, com valores de concentração na mesma ordem de grandeza das concentrações observadas nas estações. Contudo, deve-se considerar ainda na análise do desempenho dos modelos, a ausência

de dados meteorológicos de altitude na modelagem do AERMOD, o que pode influenciar significativamente os resultados.

Nota-se ainda que ambos os modelos subestimam os resultados. Um dos motivos que podem justificar a subestimação dos resultados é o fato do inventário não considerar outras importantes fontes de material particulado que estão dispersas na região de estudo. E conforme estudos recentes de caracterização do material particulado em Anchieta (descritos na seção 5.1.3), além dos processos industriais, há uma forte contribuição das atividades da construção civil, das queimadas, movimentações veiculares em vias não pavimentadas e também de aerossóis marinhos.

Além disso, como foi abordado na metodologia deste trabalho, o inventário não traz as dimensões das fontes extensas e a estratégia adotada foi o uso de um inventário de outra siderurgia, presente no Estado, para extrair esses dados, com base em alguns parâmetros de comparação. Contudo deve-se ressaltar que algumas destas fontes podem ter sido subestimadas, visto que o processo produtivo destas siderurgias apresentam suas especificidades.

Considerando essas informações, concluiu-se que, em razão das atuais limitações de dados para a modelagem atmosférica na região, os modelos AERMOD e CALPUFF não representaram satisfatoriamente os dados observados nas estações de qualidade do ar.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos posteriores na mesma região ou aplicação da metodologia indica-se algumas recomendações a fim de melhorar os resultados obtidos e implementar as discussões:

- Utilização de um inventário de fontes mais detalhado, tanto em termos de taxas de emissões, como em relação aos parâmetros físicos das fontes (por exemplo, dimensões das fontes extensas), que contemple ainda a presença de edificações nas proximidades das fontes e que apresente informações mais adequadas das fontes externas à Samarco;

- Utilização de modelos de meteorológicos de prognóstico em meso escala, como WRF e MM5, em conjunto com a simulação no modelo CALPUFF;

- Análise dos dados prevista pela modelagem com dados horários das estações, para fins de comparação em mesma escala de tempo, uma vez que a média amortece os valores de concentrações observadas;

- Refinar mais a resolução da malha do sistema de modelagem e avaliar se o custo computacional despendido traz melhoras significativas aos resultados;

- Estudar a influência de fenômenos meteorológicos de ocorrência frequente na região, nas quais os modelos Gaussianos Clássicos não são aplicáveis e avaliar a coerência dos resultados na modelagem com o CALPUFF.

- Realização de teste de sensibilidade para outros parâmetros na modelagem, como exemplo o uso das opções Puff e Slug na representação da pluma no CALPUFF;

- Uso de dados meteorológicos de altitude medidos na região, quando esses estiverem disponíveis, em ambos os modelos;

- Simulação de outros poluentes, a fim de verificar se as concentrações máximas calculadas estão abaixo dos valores indicados na Resolução CONAMA 03/90 e nas recomendações da OMS;

10. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ABE, A. T. **Anchieta – ES.** Relatório técnico. 2006. Disponível em <http://web.observatoriodasmetropoles.net/planosdiretores/produtos/es/..pdf>. Acesso em 28 maio 2011.

Área de Influência do Terminal Marítimo Privativo da Ponta de Ubu na Região Marinha. Relatório Técnico - CPM RT 428/09. SAMARCO – CEPEMAR, 2009.

BARBON, A. **Simulação das Emissões Atmosféricas sobre o Município de Araucária com uso do Modelo AERMOD**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Positivo, 2008.

BRASIL. **Constituição (1988).** Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, Senado, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (CONAMA). **Resolução CONAMA nº03/90**, de 28-6-1999. [Estabelece padrões primários e secundários de qualidade do ar e critérios de classificação de episódios críticos de poluição do ar]. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/. Acesso em 28 maio 2011.

_____. **Resolução CONAMA nº05/89**, de 06-12-1989. [Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do ar - PRONAR.] Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/. Acesso em 28 maio 2011.

BRAUER, C. **Um modelo Euleriano de Dispersão de Contaminantes Aplicados em Todas as Condições de Estabilidade**. 2004, 174 p. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Física, Centro de ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria.

BRIGGS, G. A., **Plume Rise Predictions.** In: *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis,* D. A. Haugen, ed., American Meteorological Society, Boston, pp. 59-111.

BURGOS, D. C..**Mapeamento geomorfológico aplicado a análise ambiental: Estudo de caso Serra da Jaqueçaba e seu entorno (Espírito Santo - Brasil).** Mestrado (Bacharelado em Geografia). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2009.

CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A.L.F.; AMADOR, L. A.; ARBEX, Marcos Abdo; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. . Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica.. Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 32, p. S5-S11, 2006.

CARVALHO, J.C. **Estudo dos processos de transporte e difusão na camada limite planetária utilizando os modelos RAMS e SPRAY:** Aplicação ao caso do experimento TRACT. 1999. 184 f. Tese de doutorado - IAG-USP, São Paulo.

CETESB. **Qualidade do ar no estado de São Paulo**. 2010 / CETESB. - São Paulo: 234 p. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103) . Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-doar/31-publicacoes-e-relatorios>. Acesso em 20 junho 2011.

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. 683-693, 2004b.

CORRÊA, E. B. .**Avaliação do Sistema Combinado de Modelagem MM5/CALMET na representação da Circulação Atmosférica da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2008,194 p., Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

COX, W., M., TIKVART, J. A. A., **A Statistical Procedure for Determining the best Performing Air Quality Simulation Model.** *Atmospheric Environment*, v. 24A, n. 9, p. 2387-2395, 1990.

CUNHA, B. D.; JÚNIOR, J. F. O. ; PIMENTEL, L. C. G..; SOARES, M. S. ; VELOSO, M. F. A. **Avaliação do Desempenho dos Modelos Regulatórios de Qualidade do Ar AERMOD E CALPUFF Para a BACIA AÉREA III - RJ.**. Ciência e Natura, v. 12, p. 225, 2009.

CUNHA, R. M. P.**Transporte de poluentes na região do Polo Petro químico de Triunfo - RS.**2002.155f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.2002.

DONALDSON, I.; HARRISON, D.; HILL, J. **Performance of AERMOD vs. CALPUFF Fugitive Emission Sources in the Nearfield.** In: A&WMA Annual Conference, 101., 2008. 101st Annual Conference & Exhibition. pp. 26.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Protocol For Determining The Best Performing Model**. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

_____. **User's guide for the AMS/EPA regulatory model – AERMOD.** (EPA-454/b-03-001). North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency. 2004a.

_____. **User's guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET).** (EPA-454/B-03-002). North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency. 2004b.

_____. **User's guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP).** (EPA-454/B-03-003). North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency. 2004c.

_____.**Guideline on Air Quality Models**, 40 CFR Part 51, Appendix W. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Published in the Federal Register, v. 70, n. 216, November 9, 2005.

_____. **Revision to the Guideline on Air Quality Models:** Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions. North Carolina, U.S. Environmetal Protection Agency, 2005. Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Rules and Regulations. Appendix W of 40 CRF Part 51.

FERREIRA, M. S., 2005 **Simulação do Transporte de Poluentes Atmosféricos na Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro Via o Modelo AERMOD.** Dissertação M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FURLAN, C. M., **Efeitos da poluição aérea de Cubatão.** 1998. 108f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, USP, Brasil.

GLOBAL SELF-CONSISTENT HIERARCHICAL HIGH-RESOLUTION SHORELINE (GSHHS). **Dados de linha de costa.** Disponível em http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/data/gshhs/oldversions/version1.5/gshhs_1.3.zip. . Acesso em 30 de agosto de 2011.

HOLMES, N. MORAWASKA, L. A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. **Atmospheric Environment.** V.40 p.5902-5928, 2006.

IEMA. **Relatório da Qualidade do Ar na Região da Grande Vitória** - 2007. IEMA. Cariacica. 2007.

IEMA**. Dados das estações de monitoramento de qualidade do ar na região de Anchieta e dados meteorológicos da Estação do Porto.** 2010.

IJSN. **Uso e ocupação do solo em Anchieta.** Instituto Jones Santos Neves – Vitória. 2012

Inventários de emissões de poluentes atmosféricos na AID e na AII e de gases de efeito estufa da Samarco Mineração em 2010 – Unidade Industrial Ubu. Relatório Técnico (PECOP RT-028-201). SAMARCO - PARTICLE ENGENHARIA, 2011.

JOUNGERS, B. D., NIEMEIER, D., KEAR, T., EISINGER, D., 2006, **A survey of air quality dispersion models for project-level conformity analysis**, UC Davis-Caltrans Air Quality Project, Task Order No. 44, USA.

NCEP-DOE. **Dados de Reanálises revisão 2.** Disponível em < http://nomad1.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html.>**.** Acesso em 30 agosto 2011.

MELO, A. M. V., **Avaliação de Desempenho dos Modelos AERMOD e CALPUFF Associados ao Modelo PRIME.** 2011. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo. Orientadora: Jane Meri Santos.

MORAES, M. R.. **Implementação de um sistema de modelos para a qualidade do ar.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.

_____. **Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na Micro-escala atmosférica.** 2004. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

NEDEL, A.S. **Aplicação de um Modelo de Dispersão de Poluentes na Região de Candiota-RS e sua Relação com as Condições Meteorológicas.** 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RCA/ PCA do Terminal Marítimo de Ubu – Anchieta/ES. Relatório Técnico Samarco Mineração S.A.– Cepemar. CPM RT 109/11. Travassos (Coord. Geral). Anchieta, 2011.

SANTOS, M. A.. **A Legislação Ambiental no Controle da Poluição Aérea e a Geração Termelétrica no Brasil**. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia, 1996, Rio de Janeiro. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro : COPPE/UFRJ, 1996. v. iii. p. 866-875.

SCIRE, J. S. *et al*. **A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5).** Earth Tech. Inc. 2000a.

_____. **A user's guide for the CALMET meteorological model (Version 5).** Earth Tech. Inc. 2000b.

SHEPPARD, P. A., 1956, **Air Flow Over Mountains**, Quart. J. Roy. Metror. Soc., v. 82, PP. 528-529.

SILVA; A. M.; SARNAGLIA, V. M.. **Estudo da qualidade do ar na região metropolitana da grande vitória empregando um modelo de dispersão atmosférica – CALPUFF.** 2010. Monografia (Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo. 2010

SOARES, M. S. **Avaliação do Sistema de Modelagem CALPUFF aplicado ao dióxido de enxofre para as Bacias Aéreas I, II e III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2010. 107 f. Monografia (Graduação em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010

THÉ, J. L., **Windows Interface for the U.S. EPA ISCST3, AERMOD, and ISC-PRIME Air Dispersion Models.** 2004.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Digital Elevation Model – DEM.** Disponível em < http://www.usgs.gov >. Acesso em 30 agosto 2011.

_____. **Dados de Uso e ocupação do solo.** Disponível em < http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/glcc/sa/lambert/sausgs2_0l.img.gz.>. Acesso em 30 de agosto 2011.

VELLOSO, M. F. A.. **Avaliação de Modelos Gaussianos para Fins Regulatórios –** Um Estudo para Bacia Aérea III da Região Metropólitana do Rio de Janeiro. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Com. Orientador: Luiz Claudio Gomes Pimentel.

VICENTINI, P. C.. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 E 2020 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2011. 224 p. Tese (Dissertação Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 2011.

VIEIRA, L. C. Z.; LOUREIRO, C. F. B.. **Estratégias de Harmonização:** análises de espaços de explicitação dos Conflitos Ambientais em Anchieta, ES. In: V Encontro Nacional da Anppas. Santa Catarina, Brasil. 2010. Disponível em <http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT16-71-929-20100903195055.pdf>. Acesso em 28 maio 2011.

WHO. **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.** 2005. *WORLD HEALTH ORGANIZATION* Disponível em <http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf >. Acesso em 28 maio 2011.

APÊNDICE A – Teste de sensibilidade para os dados meteorológicos de altitude (*upper air*)

Este apêndice complementa a seção 6.4.1.(b) que trata neste trabalho dos dados meteorológicos de altitude utilizados na modelagem do CALPUFF. Como já foi comentado naquela seção, os dados meteorológicos de altitude são obtidos de estações de radiossondagem, contudo na região estudo não existe nenhuma estação deste tipo e a estação mais próxima com uma base de dados desse tipo encontra-se no aeroporto de Vitória (Código da estação: WMO 83649), que está a uma distância aproximada de 70 Km.

Em virtude disso, a solução encontrada para a simulação dos dados de upper air no CALMET foi realizar um teste de sensibilidade entre os resultados da modelagem com os dados de upperair do Aeroporto de Vitória e os resultados da modelagem usando dados de reanálise, que geralmente é a base de dados adotada quando no local os dados são inexpressivos ou inexistentes.

Neste estudo foram então utilizados os dados de Reanálises 2 do NCEP-DOE disponibilizados no sitio http://nomad1.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html, nas latitudes e longitudes correspondentes a malha computacional deste estudo. Parte dos dados está dividida em 17 níveis isobáricos para quatro horas (Hora UTC 0, 6, 12, 18), porém para este trabalho foram extraídos os dados de altura geopotencial, temperatura e velocidades u e v apenas para os níveis de 1000hPa, 925hPa, 850hPa, 700hPa, 600hPa, 500hPa, 400hPa e 300hPa.

Após a coleta dos dados, esses tiveram que passar por vários tratamentos, como descrito abaixo, para ao final do processo ficar no formato de leitura aceito pelo CALMET.

Numa primeira etapa, os dados de reanálise coletados foram formatados por um código na linguagem Fortran, desenvolvida pelos autores, de modo que calcula-se a direção do vento pelas vetorias (u,v) da velocidade e extraísse apenas os dados nas horas UTC 0 e 12, já que o CALMET precisa de apenas dois perfil diários. Após isso, os dados foram remanejados para outro código, também desenvolvido pelos autores, com o intuito de unir as informações dos parâmetros meteorológicos em cada altura geométrica do dia e hora correspondente de 2010. Ao final, da compilação do programa em Fortran, era impresso um arquivo de saída na extensão .dat com os dados de upperair formatados de

forma similar ao up1.dat, que é um arquivo exemplo de saída do pré-processador READ62 e que pode ser usado diretamente no CALMET.

Quanto aos dados meteorológicos de altitude do aeroporto, esses já estavam disponíveis no formato aceito pelo READ62, então para esta simulação, optou-se por utilizar o pré-processador.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do teste de sensibilidade entre as duas modelagens. Optou-se pela análise apenas na estação de Ubú, já que esta estação possui a maior porcentagem de dados disponíveis quanto comparadas às outras estações da região. O poluente de referencia usado foi PM_{10}, pelas mesmas razões da escolha da estação, ou seja, maior porcentagem de dados para esse poluente.

TABELA 5 - ANÁLISE DOS ÍNDICES ESTATÍSTICOS DOS RESULTADOS USANDO DADOS DE REANÁLISE E DADOS DO AEROPORTO.

Índices estatísticos	**Estação Ubú**		**Valor ótimo**
	Dados de *Upper air*:		
	Reanálise	**Aeroporto**	
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[1]	8.52 ± 8.40	8.3 ± 8.94	NA
Coeficiente de Correlação (COR)	0.0519	0.1058	1
Vício (µg/m³)	-19.5798	-20.0351	0
RHCES/RHCME	0.5878	0.6376	1
Desvio Fracional (FB)	-0.6702	-0.6121	0
Fator de dois (FA2)	0.3636	0.3333	1
Erro Médio Quadrático Normalizado (EMQN)	2.5610	2.6776	0
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[2]	28.19 ± 15,57		NA

1.Média da Concentração Prevista 2. Média da Concentração Observada NA. Não aplicado à Comparação.

Considerando os indicadores: média anual, vício, fator de dois e erro médio quadrático normalizado, observa-se que os dados de reanálise obtiveram melhor desempenho na modelagem. Nota-se que os indicadores estão bem próximos em ambas às simulações e, portanto, percebe-se que a escolha entre esses dados pouca influência nos resultados. Considerando essas informações, optou-se ao final pelos dados de reanálise.

APÊNDICE B - Teste de Sensibilidade Fontes Área e Fontes Polyarea

Tendo em vista que o modelo matemático AERMOD oferece duas maneiras de se declarar fontes cuja taxa de emissão é considerada em relação à área em que se localiza, foi realizado um teste de sensibilidade a partir dos parâmetros estatísticos acima descritos para a definição de maneira apresenta melhores resultados em comparação aos dados de qualidade do ar das estações de Mãe-bá e Ubú.

- Análise dos dados de monitoramento de PM10 nas estações de qualidade do ar: Porcentagem dos dados observacionais diários de PM10, durante o ano de 2010, para a Estação de Mãe-bá é de 23,3% (85 dados) e para a Estação de Ubú é de 91,2% (333 dados).

Na Tabela 6, mostra os resultados do teste de sensibilidade.

TABELA 6- COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES ESTATÍSTICOS ENTRE FONTE ÁREA E AREAPOLY NO AERMOD.

Índices estatísticos	Estações com medição de PM10				Valor ótimo
	Ubú		Mãe-bá		
	Fonte Área	Fonte Polyarea	Fonte Área	Fonte Polyarea	
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[1]	0.428483 ± 0.3611229	0.4284835 ± 0.3611359	0.6251622 ± 0.4567616	0.6251996 ± 0.4567846	NA
Coeficiente de Correlação (COR)	0.0678859	0.0678888	0.0204981	0.0204963	1
Vício (µg/m³)	-27.764430	-27.7643914	-25.153115	-25.1531015	0
RHCES/RHCME	0.0266857	0.0266883	0.0688843	0.0688898	1
Desvio Fracional (FB)	-1.9139541	-1.9139482	-1.7879239	-1.7879132	0
Fator de dois (FA2)	0.0177234	0.0177251	0.0225469	0.0225475	1
Erro Médio Quadrático Normalizado (EMQN)	78.2667840	78.2592784	51.7283796	51.7252472	0
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[2]	28.1855855 ± 15.5704359		25.6411765 ± 14.1044429		NA

1.Média da concentração prevista 2. Média da concentração observada NA. Não aplicado à comparação.

Na Tabela 6 pode-se observar que os valores entre as duas formulações para fontes superficiais são próximos, porém foi escolhida a formulação de polyarea tendo em vista que os dados de entrada são os mesmos que os utilizados no CALPUFF, além da fonte área solicitar dados opcionais como a angulação da superfície, que pela falta de dado foi utilizado o *default* do programa, que considera a angulação de 90º em relação aos pontos inseridos.

APÊNDICE C – Variação das concentrações de PM_{10} nas Estações de Inverno e Verão em 2010.

Na presente seção serão apresentadas as variações das plumas de dispersão de poluentes para os períodos de verão e de inverno do ano de 2010, usando os modelos AERMOD e CALPUFF.

- **Verão**
  - 24 horas:

    Nas Figuras 44 e 45 podem-se observar as diferenças entre a dispersão das plumas, calculadas em suas médias de 24 horas, para o período de verão, usando os modelos AERMOD e CALPUFF, respectivamente.

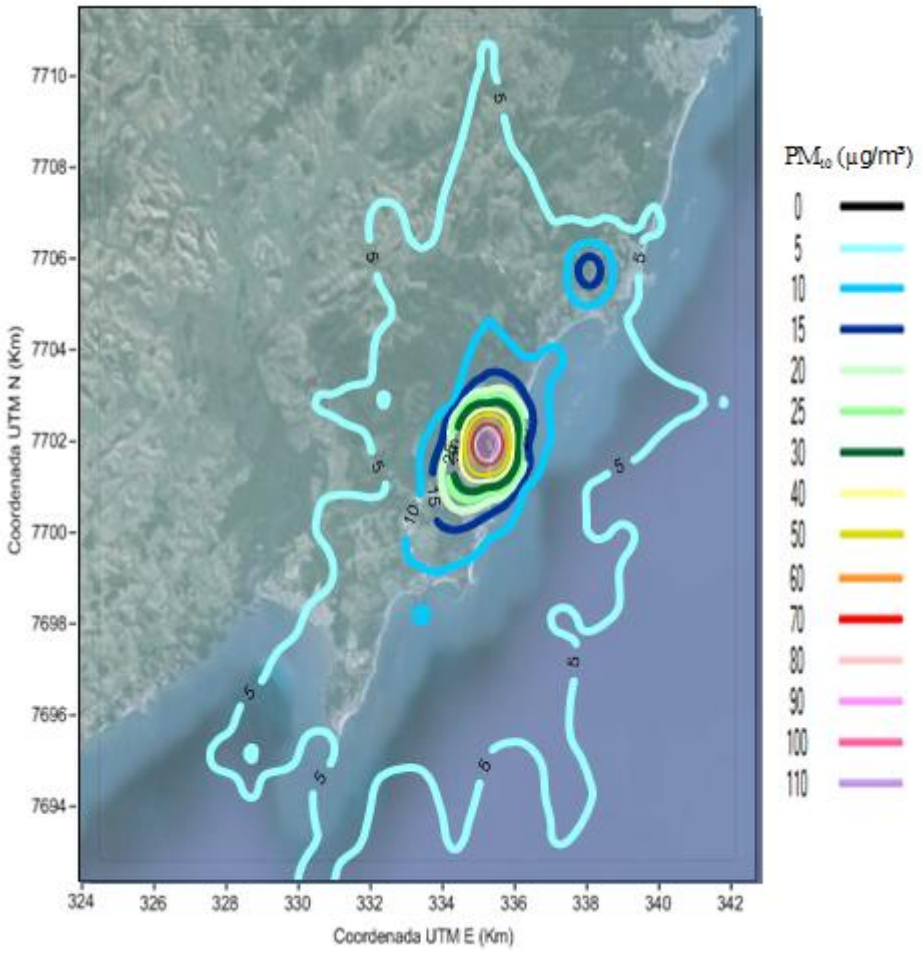


FIGURA 44 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE VERÃO USANDO O MODELO AERMOD.

Na Figura 44 pode-se observar que as concentrações são semelhantes às calculadas para o ano inteiro, tendo variação da dispersão causada pelo regime de ventos.

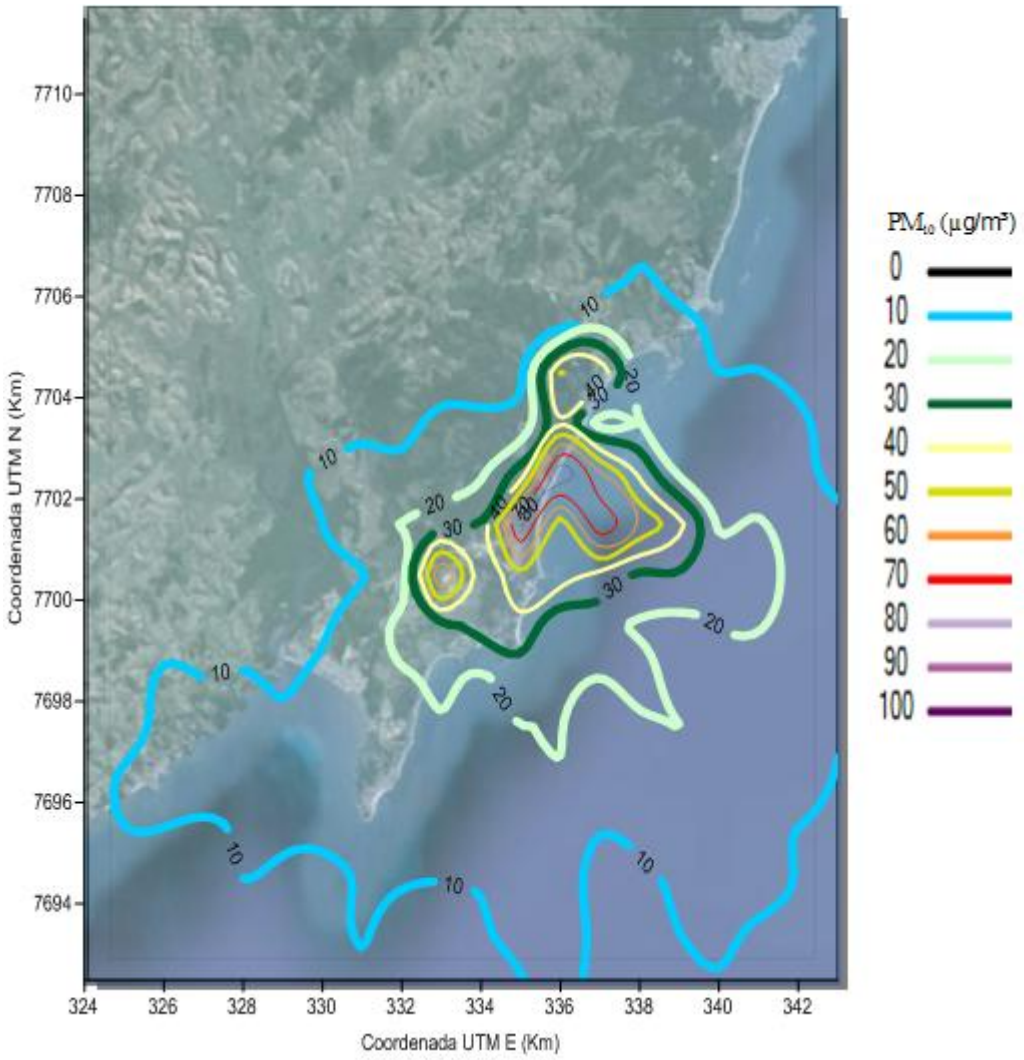


FIGURA 45 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE VERÃO USANDO O MODELO CALPUFF.

Na Figura 45 pode-se observar um efeito semelhante ao encontrado na Figura 44, uma vez que concentrações são semelhantes às calculadas para todas as estações do ano, e também apresentam variação da dispersão causada pelo regime de ventos.

- Média do período:

Nas Figuras 46 e 47 podem-se observar as diferenças entre a dispersão das plumas, calculadas para média do período, no caso a estação do verão, usando os modelos AERMOD e CALPUFF, respectivamente.

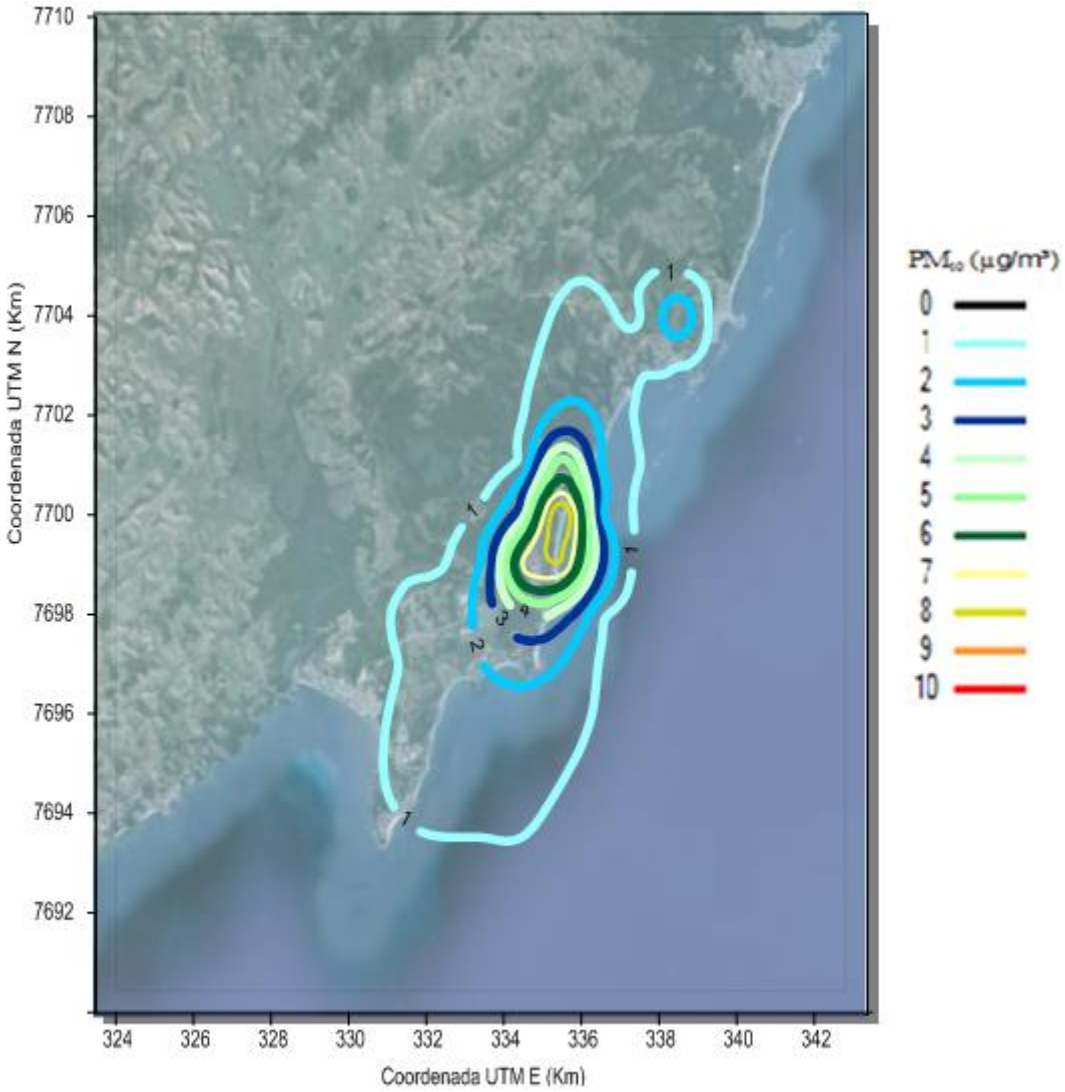


Figura 46 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE PM10 PARA O PERÍODO DE VERÃO USANDO O AERMOD.

Na Figura 46, podem-se observar concentrações superiores às presentes na média anual no interior do empreendimento, porém a direção e o comprimento da pluma são semelhantes.

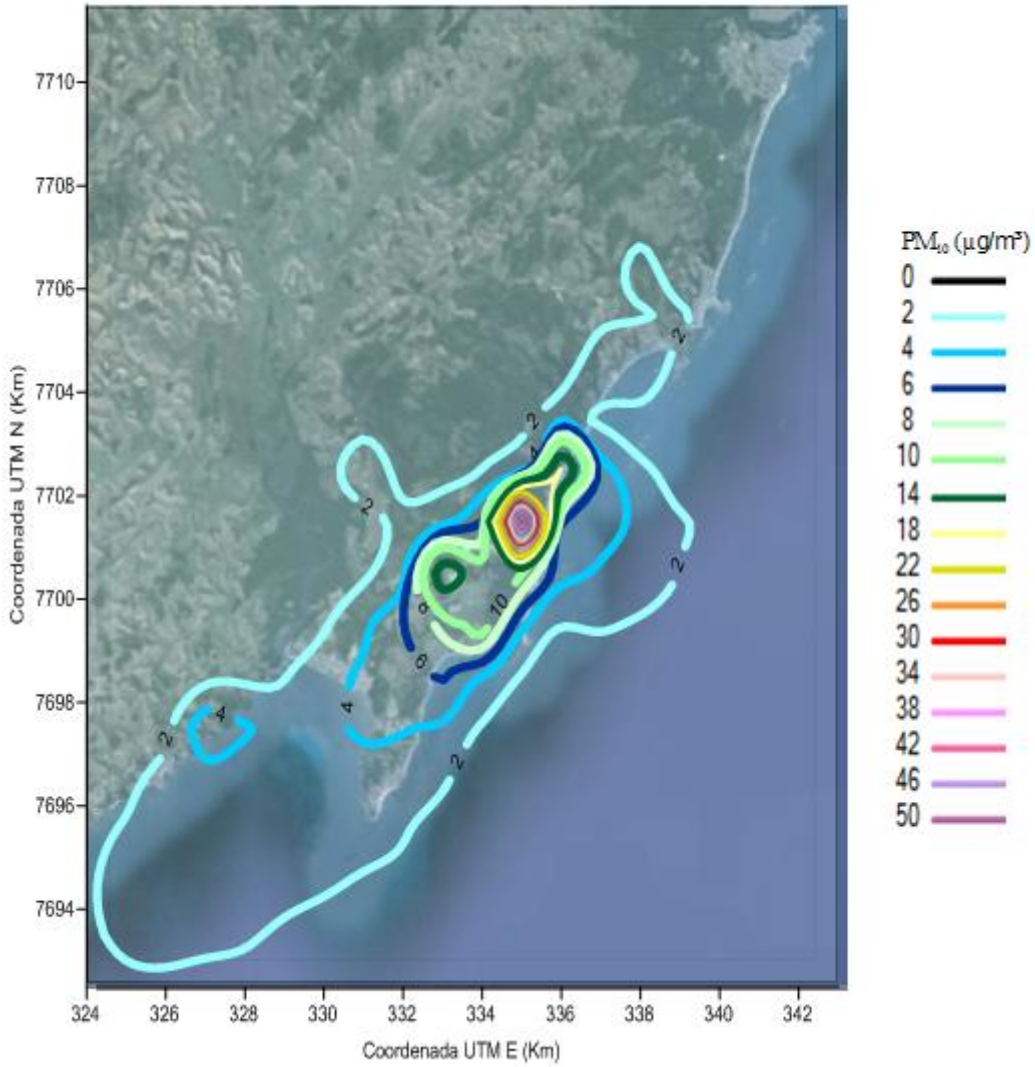


FIGURA 47 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE VERÃO USANDO O MODELO CALPUFF.

Na Figura 47, pode-se observar concentrações inferiores às presentes na média anual no interior do empreendimento, além de manter a direção e o comprimento da pluma na mesma direção que as médias anuais.

- **Inverno**
  - 24 Horas

Nas Figuras 48 e 49 podem-se observar as diferenças entre a dispersão das plumas, calculadas para as médias de 24 horas, para a estação do inverno, usando os modelos AERMOD e CALPUFF, respectivamente.

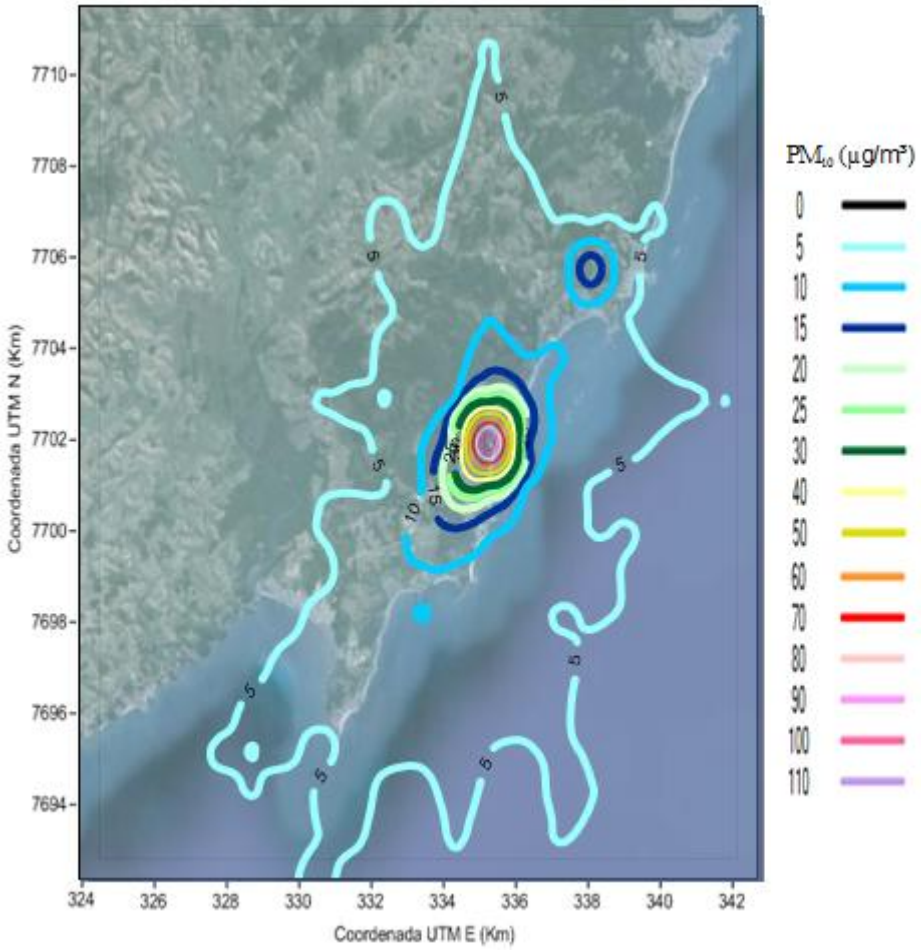


FIGURA 48 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE INVERNO USANDO O MODELO AERMOD.

Na Figura 48 observa-se que as concentrações são semelhantes às presentes na média anual em toda a malha de estudo, com alguns pontos de concentrações distintos em alguns pontos.

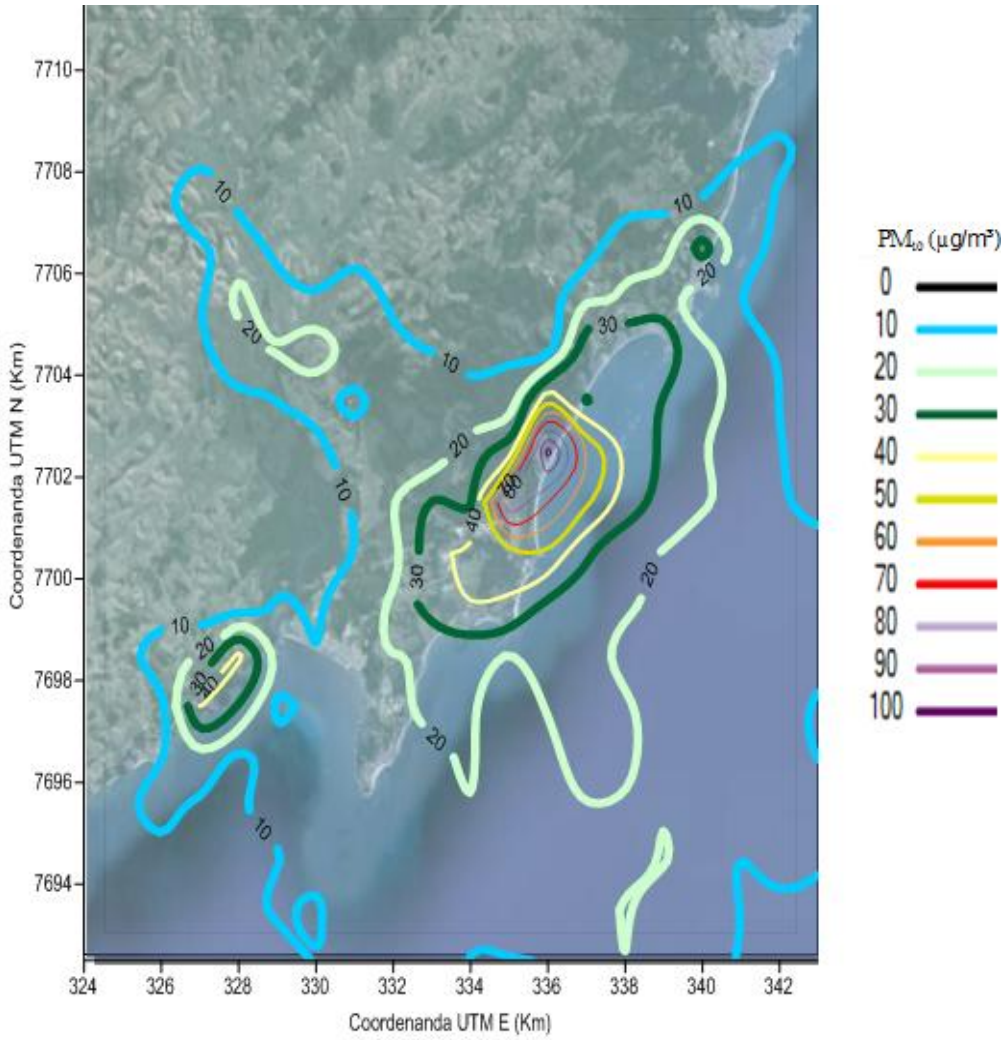


FIGURA 49 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS MÉDIAS DE 24 HORAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE INVERNO USANDO O MODELO CALPUFF.

Na Figura 49 pode-se observar que o modelo CALPUFF também apresentou concentrações semelhantes às presentes na modelagem anual, mantendo também a direção e o comprimento da pluma na mesma.

- Média do período

Nas Figuras 50 e 51 podem-se observar as diferenças entre a dispersão das plumas, calculadas para média do período, no caso a estação do inverno, usando os modelos AERMOD e CALPUFF, respectivamente.

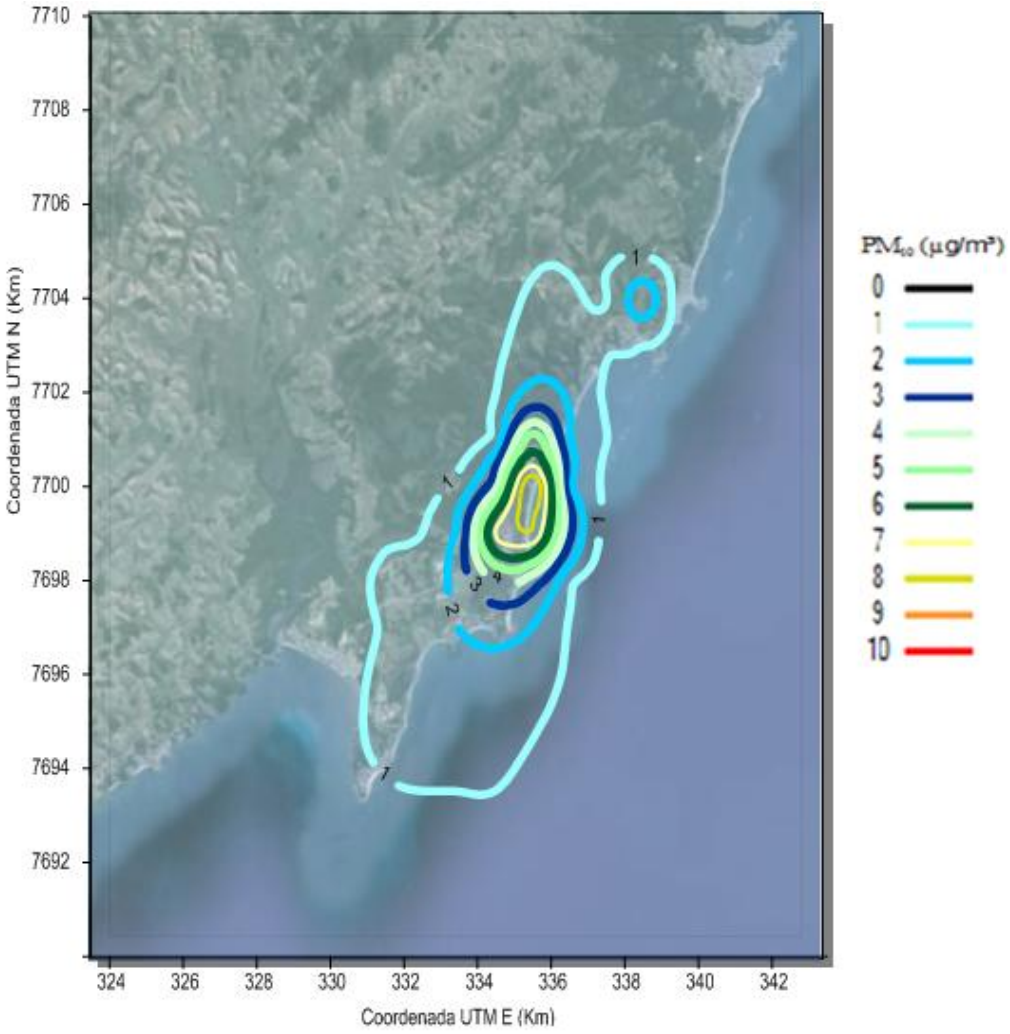


FIGURA 50 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE PM_{10} PARA O PERÍODO DE INVERNO USANDO O MODELO AERMOD.

Na Figura 50, pode-se observar concentrações similares às de inverno, apresentando valores elevados no interior do empreendimento. Porém a direção e o comprimento da pluma são semelhantes às calculadas no gráfico anual.

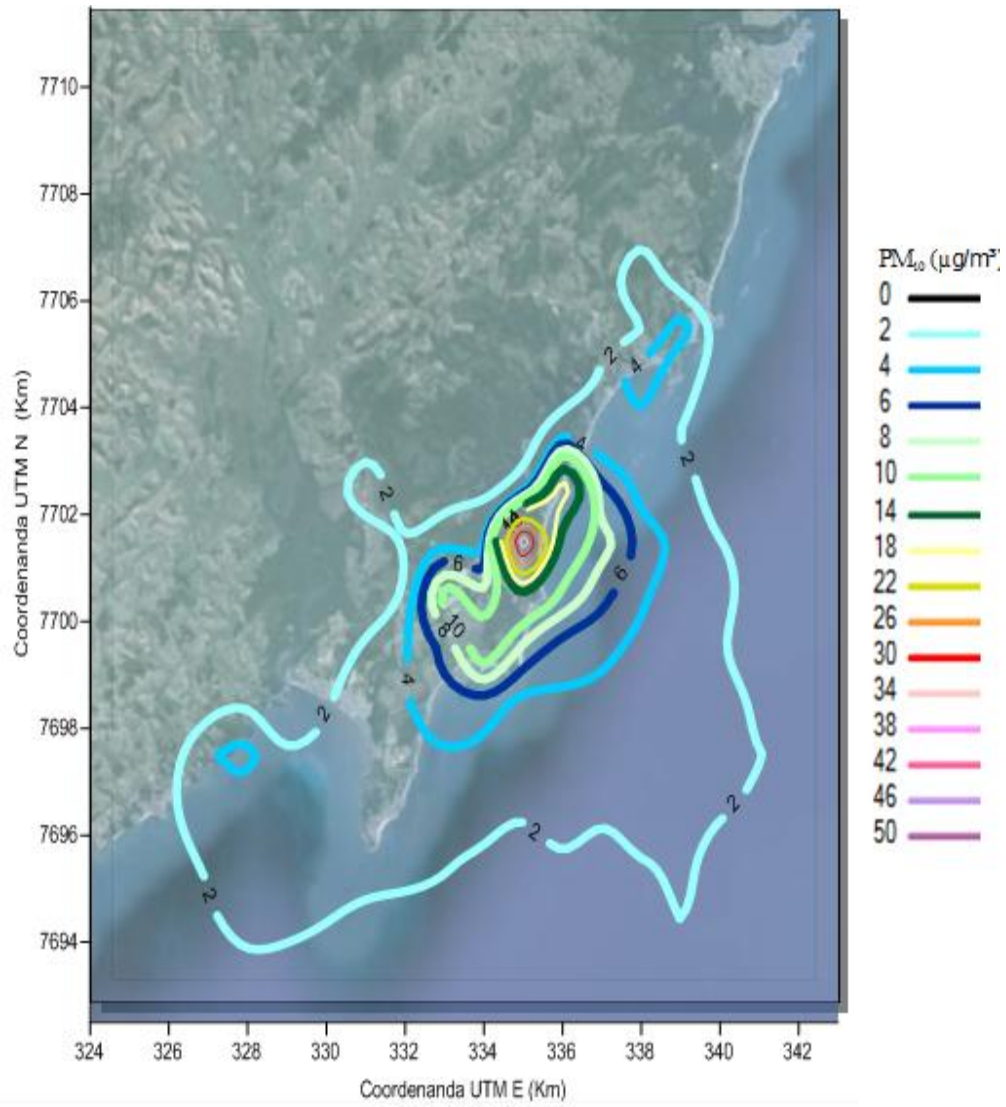


FIGURA 51 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE PM10 PARA O PERÍODO DE INVERNO USANDO O MODELO CALPUFF.

Na Figura 51, observam-se as concentrações médias no período de inverno apresentando valores semelhantes às médias anuais, contudo há alteração na direção e o comprimento da pluma, pela diferença do regime de ventos.

Quanto à variação das concentrações entre as estações, observa-se que a variação é pequena pela modelagem no AERMOD. Quanto a modelagem no CALPUFF observa-se entre os gráficos das Figuras 47 e 51, há pouca diferença nos níveis de concentração, contudo a uma maior diferença na forma da pluma. É evidente um aumento da concentração no quarto quadrante para a estação do inverno.

APÊNDICE D – Análise da Série de Tempos Calculada e Observada

Para análise visual da correlação dos valores obtidos nas modelagens de PM_{10} e os dados de monitoramento de qualidade do ar observados nas estações de Ubú e de Mãe-Bá, foram gerados gráficos das concentrações ma série de tempo. Esses gráficos são apresentados nas Figuras 52 e 53.

Concentração PM10 estação Ubú

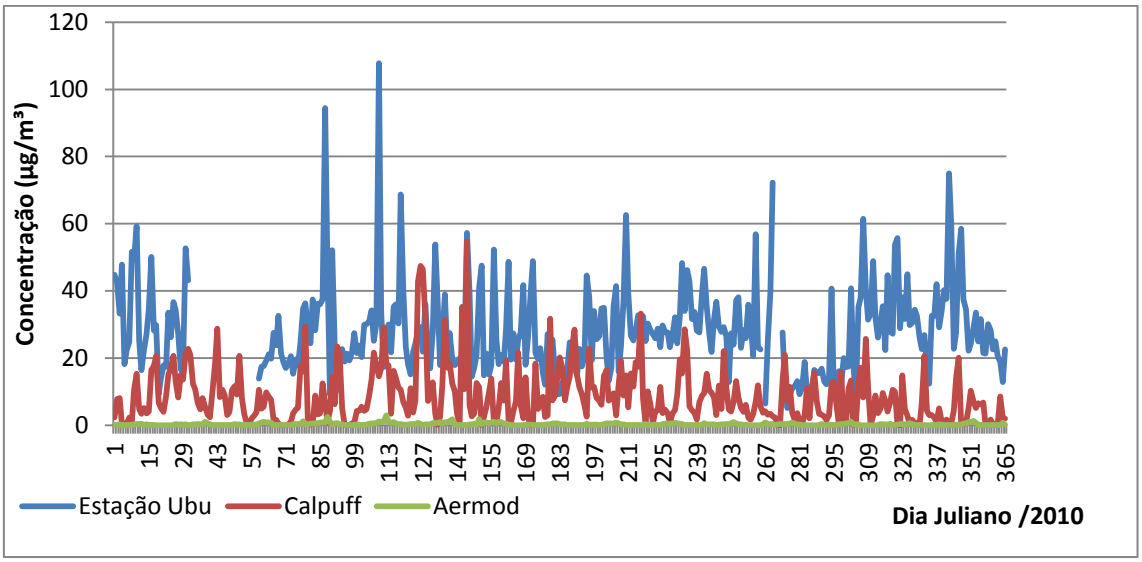


FIGURA 52 - CONCENTRAÇÕES DE PM10 MEDIDAS NA ESTAÇÃO DE UBÚ E CALCULADAS PELOS MODELOS AERMOD E CALPUFF.

Na Figura 52 pode-se observar que apesar do CALPUFF subestimar as concentrações na região, a análise do comportamento da variação das concentrações previstas com os dias, na maior parte do tempo segue o comportamento das variações das concentrações observadas na estação. As concentrações previstas pelo modelo AERMOD é pouco visível na escala do gráfico acima. Para melhor visualização dos resultados optou-se por plotá-los em um gráfico separado que é apresentado na Figura 53.

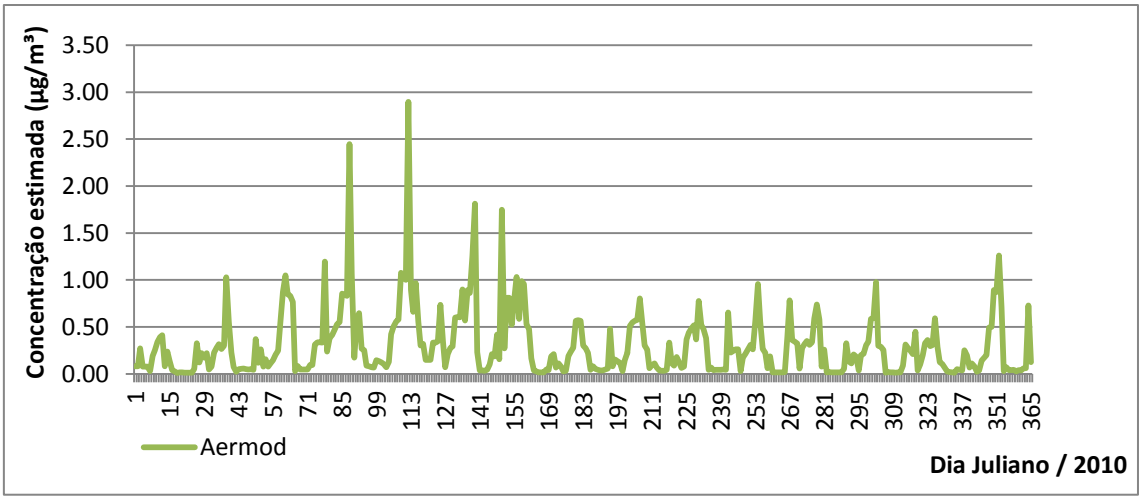


FIGURA 53 - CONCENTRAÇÕES DE PM10 CALCULADA PELO AERMOD EM µG/M³.

Na Figura 53 mostra que mesmo subestimando as concentrações de PM10 mais que o CALPUFF, o AERMOD também acompanha as alterações diárias, quando comparada com os dados medidos na estação de Ubú. Pode-se citar como exemplo dos picos de concentração entre os dias 85 e 113, que foram observados tantos nos dados da estação como nos resultados dos dois modelos.

Os gráficos da estação de Mãe-bá não foram plotados já que os dados disponíveis nesta estação são escassos para o ano de 2010.

APÊNDICE E – Avaliação da qualidade do ar segundo as diretrizes da Organização Mundial de Saúde (OMS)

A preocupação acerca da concentração de Material Particulado (MP) na atmosfera se deve ao fato de em sua composição apresentar além de compostos inorgânicos como sulfatos, metais, cloro ou nitratos, apresentar também compostos orgânicos como benzeno e dioxinas. Por esse conjunto de compostos associados o MP é considerado o poluente associado a danos à saúde humana. Estudos mostram que mesmo em concentrações baixas, dependendo do tempo de exposição, a saúde pode ser afetada (FERNANDES, CARVALHO, *et al.*, 2010).

Por causa dos efeitos colaterais da exposição de longo e curto prazo a Organização Mundial de Saúde alerta sobre reações no sistema respiratório como tosse e insuficiência respiratória, no sistema cardiovascular, além de redução da expectativa de vida devido à mortalidade cardiorrespiratória (OMS, 2004).

Assim, para garantir "um estado de completo bem-estar físico, mental e social, e não consiste apenas na ausência de doença ou de enfermidade", como é apresentado na (OMS, 2004), segue no Quadro 13 os padrões de concentração dos poluentes em estudo permitido.

QUADRO 13 - DIRETRIZES DA OMS PARA PM10.

Diretrizes da OMS		
Poluente	**Tempo de Amostragem**	**Diretriz**
		µg/m³
PM10	24 horas[1]	50
	MAA[2]	20

1.Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano.

2. Média Aritmética Anual.

Fonte: OMS (2004)

As Figuras 54 e 55 mostram a classificação da região segundo as recomendações da OMS para o poluente PM_{10}, considerando as médias de 24 horas e média anual, respectivamente, usando o modelo CALPUFF.

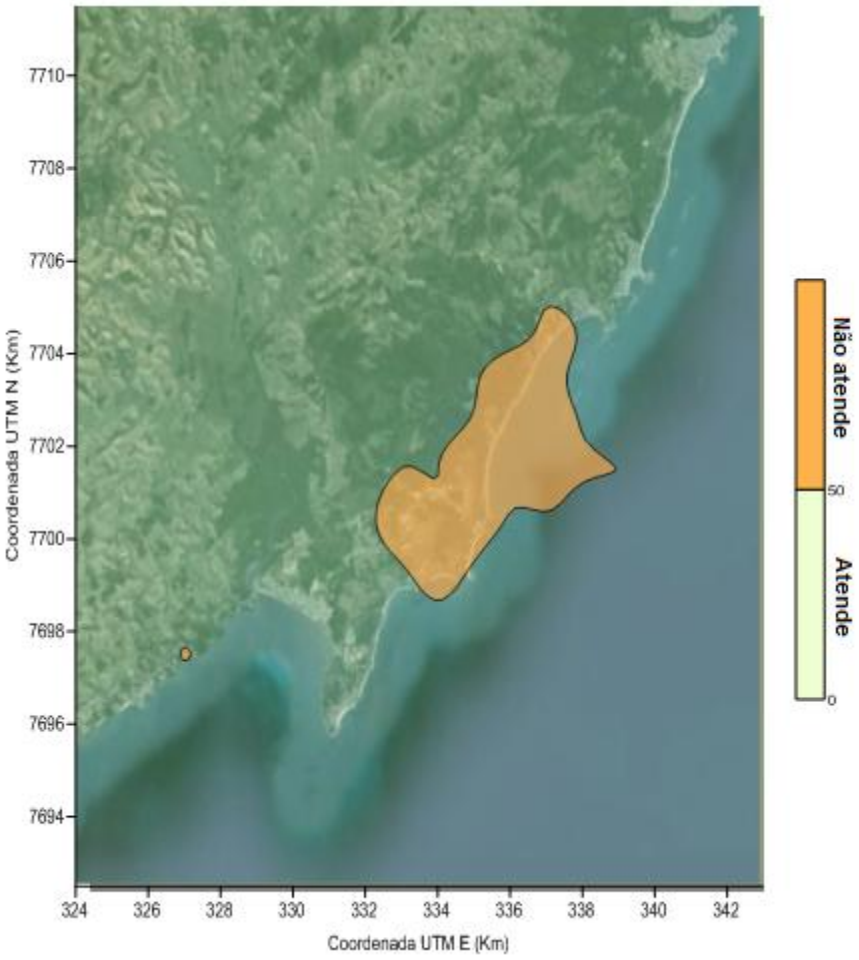


FIGURA 54 – ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO CONSIDERANDO AS RECOMENDAÇÕES DA OMS PARA PM_{10} NAS MÉDIAS DE 24 HORAS USANDO O MODELO CALPUFF.

Como os valores da Diretriz é mais restritivo que os presentes na CONAMA 03/90, a área observada que apresenta concentrações impróprias para a saúde humana pelo poluente PM_{10} são maiores, sendo a comunidade de Mãe-bá a que tem a situação mais preocupante, tanto pela concentração quanto pelo tempo de exposição a que a população está exposto.

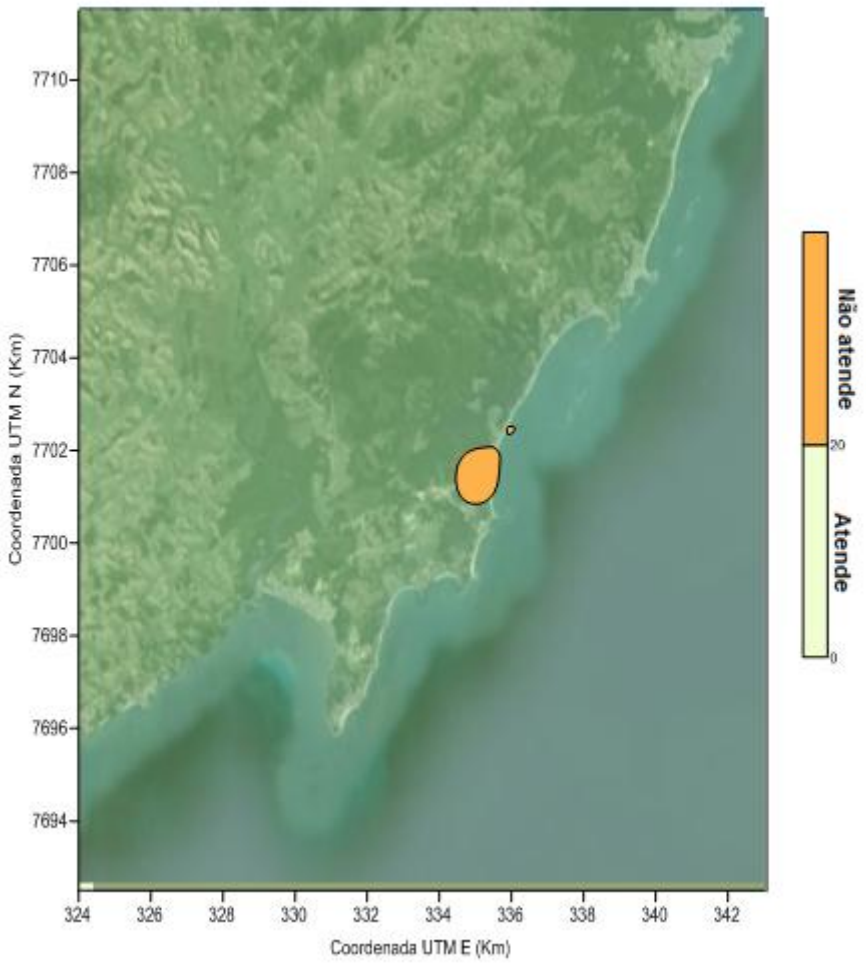


FIGURA 55 – ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR NA REGIÃO CONSIDERANDO AS RECOMENDAÇÕES DA OMS PARA PM_{10} NA MÉDIA ANUAL USANDO O MODELO CALPUFF.

Quanto à média anual, observa-se que a região que não atende as recomendações da OMS concentra-se no Complexo Siderúrgico da Samarco.

O poluente PM_{10} não possui recomendação pela OMS, já que o principal efeito deste poluente seja o incomodo causado nas pessoas.

APÊNDICE F – Análise estatística dos resultados de PTS

Neste estudo também realiou à análise estatística dos resultados da modelagem de PTS. Esta estratégia foi adotada já que este poluente é monitorado em outras duas estações da região (Anchieta e Meaípe). Contudo os dados observacionais de PTS estejam disponíveis apenas para médias de seis dias, por isso o poluente de referência adotado no estudo foi o PM_{10}. Assim, para que as análises estatísticas dos resultados fossem viáveis, foi também necessário fazer a média de seis dias para os resultados da modelagem.

A) Análise dos dados de monitoramento de PTS nas estações de qualidade do ar:

Porcentagem dos dados observacionais de PTS, durante o ano de 2010, em suas médias de seis dias, para a Estação de Mãe-bá é de 85,53% (52 dados), para a Estação de Ubú é de 88,82% (54 dados), para estação de Anchieta é de 85,53 (52 dados), para estação de Ubú 88,82 é de (47 dados).

B) Análise dos resultados da modelagem:

Na Tabela 7 são apresentados os índices estatísticos para as médias de seis dias das concentrações de PTS previstas com os modelos AERMOD e CALPUFF.

Observa-se que os fatores de correlação encontrados para os dois modelos novamente encontram-se abaixo do esperado quando comparados aos valores obtidos por Soares (2010) e Silva e Sarnaglia (2010). A estação que apresentou o melhor índice de correlação para ambos modelos foi à estação de Anchieta com os valores de -0.02 e 0,06 para o CALPUFF e o AERMOD, respectivamente. Como se pode notar pelos valores do vício, todos os casos deram negativo, portanto ambos os modelos subestimaram as concentrações do poluente. Como já foi dito anteriormente, valores maiores que um para a razão RHC indicam sobrepredições, os menores subpredições para as maiores concentrações. Observa-se que na maioria das estações para ambos os modelos os valores de RHC estiveram abaixo de um, com exceção dos resultados para o CALPUFF nas Estações de Mãe-Bá e Ubú. Neste caso as concentrações mais altas previstas pelo modelo superam as concentrações máximas medidas.

Quanto ao índice FB, pode-se chegar a mesma conclusão da análise de RHC, já que FB negativo indica que o modelo subestima as máximas concentrações e quando positivo,

sobre-estima. Observa-se ainda que para as modelagens com o AERMOD, os índices FB estão próximos de -2 que indica subestimação extrema. Nas referências Soares (2010) e Silva e Sarnaglia (2010), o valor encontrado para FB foi maior que zero para o modelo CALPUFF em ambos os estudos e menor que zero para o modelo AERMOD.

Em relação aos valores do FA2, nota-se que o desempenho do CALPUFF foi melhor que do AERMOD em todas as estações. Destaca-se o resultado obtido com o CALPUFF para a estação de Mãe-Bá, onde o FA2 alcançou o valor de 0,76, sendo o valor ótimo 1.

Por última análise, os valores obtidos para o EMQN foram altos em todas as estações, sendo os piores valores foram encontrados na modelagem com o AERMOD.

A estação que apresentou os piores resultados na modelagem do CALPUFF foi à estação de Meaípe, o que era esperado considerando sua localização e o regime do vento predominante na região.

TABELA 7 - COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES ESTATÍSTICOS PARA OS RESULTADOS DO AERMOD E CALPUFF QUANTO AO POLUENTE PTS.

Índices estatísticos	**Estações com medição de PTS**								**Referências**			**Valor ótimo**
	Anchieta		**Meaípe**		**Mãe-bá**		**Ubú**		**SOARES, 2010**		**SILVA e SARNAGLIA, 2010[3]**	
	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	CALPUFF	AERMOD	**CALPUFF**	**AERMOD**	**CALPUFF**	
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[1]	4.34 ± 6.36	0.09 ± 0.09	2.56 ± 10.65	1.32 ± 4.01	21.0 ± 52.7	0.11 ± 0.08	25.78 ± 21.46	0.75 ± 0.49	NA	NA	NA	NA
Coeficiente de Correlação (COR)	-0.17	0.06	-0.02	-0.09	-0.15	-0.19	-0.12	-0.11	0,36	0,58	0.08	1
Vício (µg/m³)	-38.82	-42.74	-60.26	-75.19	-49.78	-64.22	-46.46	-65.83	-	-	2.23	0
RHCES/RHCME	0.51	0.00	0.30	0.06	1.62	0.00	1.07	0.03	-	-	1.74	1
Desvio Fracional (FB)	-0.81	-1.98	-1.17	-1.82	0.23	-1.98	0.08	-1.89	0,9	-0,07	0.53	0
Fator de dois (FA2)	0.15	0.00	0.08	0.04	0.76	0.00	0.39	0.01	0,33	0,74	1	1
Erro Médio Quadrático (EMQN)	11.17	590.99	32.19	72.61	4.66	816.85	2.13	104.94	1,98	0,43	0.28	0
Média anual ± Desvio Padrão (µg/m³)[2]	42.84 ± 22.2		64.33 ± 39.72		76.88 ± 41,62		66.51 ± 30.66		NA	NA	NA	NA

1. 1. Média da concentração prevista. 2. Média da concentração observada. 3. Dados da estação de Enseada do Suá. NA. Não aplicado à comparação.

ANEXO A - Escala Beaufort

As primeiras informações sobre escalas de vento datam do início dos anos 1700. Eram usadas pelos navegadores para estimar a força dos ventos, a partir da observação do seu efeito sobre o aspecto da superfície do mar. Em 1806, o Contra-Almirante britânico Francis Beaufort, um Hidrógrafo, descreveu em seu diário, pela primeira vez, a escala que leva seu nome e que é utilizada até hoje. A escala de Beaufort é apresentada no Quadro 14.

QUADRO 14 - ESCALA BEAUFORT

Beaufort	Condição	Vento, m/s	Efeitos observados em terra e no mar
0	Calma	< 0,3	Fumaça sobe verticalmente; nada se move com o vento. Mar como um espelho.
1	Aragem	0,3 – 1,5	Direção do vento dada pela fumaça; cataventos não se movem. Ondinhas escama de peixe.
2	Brisa leve	1,6 – 3,3	Folhas e pequenos arbustos movendo-se; sente-se o vento no rosto. Ondinhas de 20 cm.
3	Brisa fraca	4,3 – 5,4	Folhas e pequenos arbustos em agitação contínua; bandeiras abrindo. Ondinhas ainda não quebram, c/ 60 cm.
4	Brisa moderada	5,5 – 7,9	Pequenos galhos em movimento; poeira e papéis levantados. Ondinhas iniciando a formar espuma, mas ainda sem quebrar, com até 1m.
5	Brisa forte	8,0 – 10,7	Galhos grandes e pequenas árvores começam a mover-se. Ondas com cristas, "carneirinhos".
6	Vento fresco	10,8 – 13,8	Galhos grandes de árvores agitados; fios de postes assobiam; difícil usar guarda-chuva. Ondas mais longas se formam, com até 3 metros. Veleiros usam rizo 2 nas velas.
7	Vento forte	13,9 – 17,1	Árvores com troncos oscilam; dificuldade em caminhar contra o vento. Mar grosso com ondas de até 4 m cuja espuma é arrancada pelo vento. Barcos pequenos não navegam.
8	Ventania	17,2 – 20,7	Quebram-se galhos nas árvores; difícil andar contra o vento. Ondas com 5 m cujos topos iniciam-se a quebrar, gerando nuvens brancas com o vento. Barcos permanecem no porto.
9	Ventania forte	20,8 – 24,4	Pequenos danos em edificações, com telhas e chaminés arrancadas. Ondas de 7 m com mar rugindo e visibilidade difícil.
10	Tempestade	24,5 – 28,4	Árvores são derrubadas; danos estruturais em edificações. Ondas de 9 m em mar revolto, perigoso e ruidoso.
11	Tempestade Violenta	28,5 – 32,6	Prejuízos e perigos generalizados. Mar com ondas de 11 m e muita espuma; grande perigo para todos os navios.
12	Furacão	32,7 – 36,9	Prejuízos e destruição graves e generalizados. Mar revolto branco com ondas de 14 m e ar cheio de espuma.

Fonte: www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/refer/escala_beaufort.htm