

Vicente Francisco Camara

**AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DOS LIMITES DE
CONCENTRAÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA NA PROTEÇÃO
DA QUALIDADE DO AR**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de mestre em Engenharia
Ambiental

Orientador:
Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Camara, Vicente Francisco

Avaliação da efetividade dos limites de concentração de emissão de poluentes atmosféricos da indústria cerâmica na proteção da qualidade do ar / Vicente Francisco Camara ; orientador, Henrique De Melo Lisboa - Florianópolis, SC, 2015.

163 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Poluição atmosférica. 3. Padrão de emissão. 4. Modelagem. 5. Indústria cerâmica. I. De Melo Lisboa, Henrique. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Vicente Francisco Camara

**AVALIAÇÃO DA EFETIVIDADE DOS LIMITES DE
CONCENTRAÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA NA PROTEÇÃO
DA QUALIDADE DO AR**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de mestre em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 16 de abril de 2015.

Prof. William Gerson Matias Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Henrique de Melo Lisboa, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Andreas Friedrich Grauer, Dr.
Universidade Federal do Paraná

Prof. Davide Franco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Alveri, e minha mãe, Lourdes, pelos exemplos, valores e educação que me deram. Além disso me permitiram a dedicação exclusiva aos estudos durante toda a vida estudantil, apesar dos momentos difíceis.

Ao professor Henrique de Melo Lisboa, por todo o apoio durante a trajetória acadêmica, pelas contribuições e liberdade dada à execução desse trabalho.

Ao Leonardo Hoinaski, que considero como meu irmão, por todo o suporte, desde os tempos de bolsista de iniciação científica, até o presente momento. Me ensinou boa parte do conhecimento empregado no desenvolvimento dessa dissertação. Além disso, pela amizade e boas risadas.

À banca, pelas inestimáveis contribuições para o aprimoramento dessa dissertação.

A todos os professores que tive durante todo o percurso estudantil. Cada um contribui de alguma forma para a minha formação, e consequentemente para a realização desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por todas as oportunidades que me foram concedidas, desde a bolsa de iniciação científica, passando pela ciência sem fronteiras até o mestrado.

Aos contribuintes federais e catarinenses que custearam as oportunidades de estudo que tive desde o ensino básico até a conclusão desse trabalho.

A todas as entidades e pesquisadores que se dedicam a disponibilização de ferramentas e de dados de maneira gratuita.

Ao Marno Boer por todo o suporte, amizade e prontidão em ajudar, qualquer que fosse o problema.

A minha irmã Julia, pelo carinho. A minha família (por parte do pai ou de mãe) pelo apoio e inspiração para o desfecho desse trabalho.

À Mariana Godke, pela amizade, apoio e convívio que sempre rendeu momentos divertidos.

Aos colegas do Laboratório de Controle de Qualidade do Ar, desde a época de iniciação científica (Gilson, Isabel, Valéria e Álvaro) até o mestrado (Veridiana, Mariane, Paula, Andy, Diogo, Marlon e Franciele) pelo apoio, convívio amistoso e bons momentos.

Aos amigos do Laboratório de Hidrologia (João, Albert, Roberto, Fabiane, Tássia e Pedro) pela companhia e momentos de diversão.

RESUMO

O impacto causado pelas emissões atmosféricas por fontes pontuais começou a ganhar atenção a partir do momento em que episódios críticos de poluição do ar ocorreram. Um dos métodos para conter a degradação da qualidade do ar foi a definição de padrões de emissão, limitando a quantidade de poluentes emanados por fontes fixas pontuais. Quando há a comparação de regulamentações entre os diversos países, nota-se que existe uma discrepância nos parâmetros empregados na restrição de emissões atmosféricas. No Brasil, por exemplo, limitar as concentrações em chaminés é a principal maneira de controlar o lançamento de poluentes no ar. Através desse método, não se consideram outros fatores importantes, como a vazão de emissão, a topografia do terreno e a ocupação do solo. Esse trabalho visou verificar a efetividade dos limites de emissão brasileiros (CONAMA e SEMA/PR) e internacionais (Índia, Estados Unidos e União Europeia) na salvaguarda da qualidade do ar. Isso foi feito por meio do uso do modelo AERMOD, para o caso de emissões da indústria de cerâmica vermelha do sul do estado de Santa Catarina. Averiguou-se que o cenário de emissão brasileiro (CONAMA), ao lado do indiano, foram os mais impactantes para os poluentes avaliados. O limite de emissão brasileiro causou a ultrapassagem do padrão de qualidade do ar para os dois poluentes avaliados (particulado total em suspensão - PTS e dióxido de nitrogênio - NO₂). Os limites de emissão dos Estados Unidos e da União Europeia (UE) seriam suficientes para evitar impactos do PTS. Já o padrão de emissão da UE para o NO₂ ainda não seria suficiente para garantir o padrão de qualidade do ar.

Palavras-chave: Poluição atmosférica, padrão de emissão, modelagem, AERMOD, indústria cerâmica.

ABSTRACT

The impact caused by atmospheric emissions from point sources started gaining concerns from the moment that critical air pollution episodes occurred. One of the methods that was applied to contain air quality degradation was the establishment of emission standards, limiting the amount of pollutants emanating from stationary point sources. When there is a comparison among countries' regulations, one notes that there is a discrepancy among the parameters used in the restriction of air emissions. In Brazil, for example, the concentrations are the main way to limit the release of pollutants into the air. Through this method, important factors are not taken in account (such as flow rate, land use and relief). This work aimed to evaluate the effectiveness of brazilian's (CONAMA and SEMA/PR) resolutions and international regulations (India, United States and European Union) in safeguarding air quality. This was done through the use of AERMOD model, for the southern Santa Catarina state red clay industries case of emissions. It was noticed that the brazilian and the indian emission standards were the most critical for air quality. Brazil's emission limit compromised significantly air quality for total suspended particles (TSP) and overcame nitrogen dioxide's (NO₂) air quality hour standard. United States' and European Union's emission standards would be enough to guarantee air quality for TSP. But European Union's emission limit wouldn't ensure NO₂ air quality 1 hour standard.

KEYWORDS: Atmospheric pollution, emission standard, modeling, AERMOD, ceramic industries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Distribuição hipotética log-normal do volume relativo das partículas em função do diâmetro aerodinâmico.....	30
Figura 2 - Diâmetro das partículas dos diferentes processos de formação (μm).....	32
Figura 3 - Emissão de poluentes na combustão.	37
Figura 4 - Esquema de Funcionamento do AERMOD (em cinza os dados de entrada).....	65
Figura 5 – Etapas produtivas das indústrias de cerâmica vermelha (olarias).	70
Figura 6 - Localização da área de estudo	77
Figura 7 - Concentração de empresas e nº de empregados na produção de cerâmicas no Sul catarinense.....	78
Figura 8 - Origem dos dados e etapas do trabalho.	79
Figura 9 - Histogramas dos dados coletados de emissão das olarias. ..	81
Figura 10 - Topografia da região de estudo (altitude e coordenadas em metros).....	84
Figura 11 - Rosas dos ventos (proveniência) para cada estação do ano, usando os 5 anos de dados meteorológicos (velocidade em m.s^{-1}).	86
Figura 12 - Cobertura do solo na região de estudo.....	89
Figura 13 - Localização das fontes de emissão (olarias) levantadas e da grade selecionada para a modelagem.	91
Figura 14 - Detalhamento da locação da grade de modelagem e das fontes em cada um dos municípios.....	92
Figura 15 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário CONAMA.	96
Figura 16 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário CONAMA.	98
Figura 17 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário CONAMA.	100
Figura 18 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário SEMA.....	103
Figura 19 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário SEMA.	105
Figura 20 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário SEMA.....	106
Figura 21 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário Índia.	109
Figura 22 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário Índia.	110

Figura 23 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário Índia.	112
Figura 24 - Máximas concentrações da média horária de NO ₂ para os 5 anos modelados - Cenário CONAMA.	121
Figura 25 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO ₂ - Cenário CONAMA.	123
Figura 26 - Concentrações médias anuais para o NO ₂ (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário CONAMA.	125
Figura 27 - Máximas concentrações da média horária de NO ₂ para os 5 anos modelados - Cenário SEMA.	128
Figura 28 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO ₂ - Cenário SEMA.	130
Figura 29 - Concentrações médias anuais para o NO ₂ (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário SEMA.	132
Figura 30 - Máximas concentrações da média horária de NO ₂ para os 5 anos modelados - Cenário UE.	135
Figura 31 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO ₂ - Cenário UE.	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Constituintes da atmosfera não poluída seca (a 25 °C e 1 atm).....	27
Quadro 2 - Classificação do material particulado conforme a CETESB.	29
Quadro 3 - Efeitos provocados pelos poluentes na saúde.....	39
Quadro 4 - Padrões de emissão da Resolução 08/1990 do CONAMA.....	42
Quadro 5 - Padrões de emissão para o coprocessamento de resíduos na produção de cimento - Resolução nº 264/99 do CONAMA.	43
Quadro 6 - Atividades e poluentes regulamentados pela CONAMA 382/06.	45
Quadro 7 - Atividades e Poluentes Regulamentados pela CONAMA 436/11.	47
Quadro 8 - Limites de emissão dos anexos II e IV da Resolução 382/2006.	49
Quadro 9 - Limites de emissão dos anexos II e IV da Resolução CONAMA nº 436/2011.	50
Quadro 10 - Limites de emissão da Resolução SEMA/PR nº 16/2014.....	51
Quadro 11 - Limites de emissão propostos nos Estados Unidos para a indústria cerâmica (a 7% de oxigênio).....	52
Quadro 12 - Concentrações referência da emissão da indústria cerâmica na União Europeia.....	54
Quadro 13 - Padrão de emissão para a produção de tijolos na Índia. ...	54
Quadro 14 - Objetivos estabelecidos pela Portaria nº 231/1976.....	55
Quadro 15 - Padrões de qualidade do ar constantes na Resolução nº03/1990.....	56
Quadro 16 - Comparação entre os padrões nacionais e paulistas.	57
Quadro 17 - Incremento permitido na concentração ambiental de poluentes conforme a PSD dos Estados Unidos.....	59
Quadro 18 - Classificação dos modelos de dispersão atmosférica	62
Quadro 19 - Classificação de acordo com os fins de aplicação do modelo.	63
Quadro 20 - Conteúdo e parâmetros mínimos para um estudo de modelagem de dispersão atmosférico conforme a CETESB.....	68
Quadro 21 - Concentrações e altura mínima de emissão para cada cenário.....	82
Quadro 22 - Características das bandas eletromagnéticas, detectadas pelo satélite LANDSAT 8, utilizadas no presente trabalho.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações típicas de NO _x na camada limite.	35
Tabela 2 - Principais fontes de NO _x	35
Tabela 3 - Matriz energética do setor cerâmico no Brasil (em percentual de energia consumida).	49
Tabela 4 - Número de empresas e empregados do setor cerâmico em Santa Catarina por porte.	72
Tabela 5 - Porcentagem de olarias usando cada combustível.	74
Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos dados de emissão das olarias. ..	80
Tabela 7 - Comparação das normais climatológicas com as médias mensais os dados coletados e intervalo de confiança de 95%.	85
Tabela 8 - Percentual da cobertura do solo em cada um dos 4 setores.	89
Tabela 9 - Albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície em cada um dos setores da área.	90
Tabela 10 - Características das grades utilizadas no estudo.	92
Tabela 11 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário CONAMA.	97
Tabela 12 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário CONAMA.	99
Tabela 13 - Ano e número de violações do PQAR diário em cada receptor - Cenário CONAMA.	99
Tabela 14 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário CONAMA.	101
Tabela 15 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário CONAMA.	102
Tabela 16 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário SEMA.	104
Tabela 17 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário SEMA.	105
Tabela 18 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário SEMA.	107
Tabela 19 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário SEMA.	108
Tabela 20 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário Índia.	109
Tabela 21 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário Índia.	111
Tabela 22 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário Índia.	113

Tabela 23 - 98° Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário Índia.....	114
Tabela 24 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário Estados Unidos.	115
Tabela 25 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário Estados Unidos.....	116
Tabela 26 - 98° Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário Estados Unidos.....	117
Tabela 27 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário União Europeia.	118
Tabela 28 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário União Europeia.	119
Tabela 29 - 98° Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário União Europeia.....	120
Tabela 30 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO ₂ encontradas durante a modelagem - Cenário CONAMA.	122
Tabela 31 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO ₂ - Cenário CONAMA.	124
Tabela 32 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO ₂ - Cenário CONAMA.....	126
Tabela 33 - 99,78° Percentil das concentrações horárias de NO ₂ nos receptores críticos - Cenário CONAMA.	127
Tabela 34 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO ₂ encontradas durante a modelagem - Cenário SEMA.....	129
Tabela 35 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO ₂ - Cenário SEMA. ...	131
Tabela 36 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO ₂ - Cenário SEMA.	133
Tabela 37 - 99,78° Percentil das concentrações horárias de NO ₂ nos receptores críticos - Cenário SEMA.....	134
Tabela 38 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO ₂ encontradas durante a modelagem - Cenário UE.	136
Tabela 39 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO ₂ - Cenário UE.....	138
Tabela 40 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO ₂ - Cenário UE.....	138
Tabela 41 - 99,78° Percentil das concentrações horárias de NO ₂ nos receptores críticos - Cenário UE.	139
Tabela 42 - Diferença entre os cenários de emissão do MP.....	140

Tabela 43 - Comparação do impacto resultante dos diferentes cenários para as concentrações diárias de PTS.....	140
Tabela 44 - Comparação de impacto dos cenários na ultrapassagem do padrão diário de PTS.....	141
Tabela 45 - Comparação de impacto dos cenários na média anual da concentração de PTS.....	142
Tabela 46 - Diferença entre os dados dos cenários de emissão para o NO ₂	143
Tabela 47 - Comparação do impacto dos diferentes cenários na concentração horária de NO ₂	143
Tabela 48 - Comparação do impacto dos diferentes cenários na violação do padrão primário de NO ₂	144
Tabela 49 - Comparação do impacto dos cenários no padrão de qualidade do ar anual do NO ₂	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAT - *Best Available Technologies*
CAP - *Criteria Air Pollutant*
CETESB - Companhia Ambiental do estado de São Paulo
CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
EEA - Agência Europeia de Meio Ambiente
EUA - Estados Unidos da América
FATMA - Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina
FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
HAP - *Hazardous Air Pollutant*
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAER - *Lowest Achievable Emission Rate*
MACT - *Maximum Achievable Control Technology*
MME - Ministério de Minas e Energia
MP - Material Particulado
MP₁₀ - Partículas Inaláveis
MP_{2,5} - Partículas Inaláveis Finas
MTE - Ministério do Trabalho e Emprego
NAAQS - *National Ambient Air Quality Standards*
NAS - *National Academy of Sciences*
NASA - Agência Espacial Americana
NSR - *New Source Review*
OMS - Organização Mundial da Saúde
PRONAR - Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PSD - *Prevention of Significant Deterioration*
PTN - Potência Térmica Nominal
PTS - Partículas Totais em Suspensão
SEMA - Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná
SIP - *State Implementation Plans*
UE - União Europeia
UKDEFRA - Departamento de Meio Ambiente, Alimentos e Assuntos Rurais do Reino Unido
USEPA - Agência Estadunidense de Proteção Ambiental
USGS - Serviço Geológico dos Estados Unidos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. OBJETIVO GERAL	25
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. A ATMOSFERA	27
2.2. POLUENTES ATMOSFÉRICOS	28
2.2.1. Material particulado	28
2.2.2. Óxidos de nitrogênio	34
2.3. EFEITOS À SAÚDE PROVOCADOS PELOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	37
2.4. LEGISLAÇÃO REGULATÓRIA SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	39
2.4.1. Padrões de emissão no Brasil	40
2.4.2. Padrões de emissão da indústria da cerâmica	48
2.4.3. Padrões de qualidade do ar no Brasil	54
2.4.4. O gerenciamento da qualidade do ar nos Estados Unidos	58
2.5. MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	61
2.5.1. Tipos de modelos	62
2.5.2. Modelo AERMOD	64
2.5.3. Avaliação de impacto ambiental no ar através da modelagem de dispersão atmosférica	66
2.6. PRODUÇÃO DE CERÂMICA	69
2.7. O SETOR CERÂMICO EM SANTA CATARINA	71
3. MATERIAIS E MÉTODO	77
3.2. MODELO AERMOD	78
3.2.1. Dados de emissão	79
3.2.2. Dados de relevo	83
3.2.3. Dados meteorológicos	84
3.2.4. Dados de cobertura do solo	87
3.2.5. Receptores	90
3.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO, PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	93
3.3.1. Procedimentos de modelagem	93
3.3.2. Apresentação dos resultados	94
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4.1. PARTICULADO TOTAL EM SUSPENSÃO (PTS)	96
4.1.1. Cenário CONAMA	96
4.1.2. Cenário SEMA	102
4.1.3. Cenário Índia	108
4.1.4. Cenário Estados Unidos	114

4.1.5. Cenário União Europeia.....	117
4.2. DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO ₂).....	120
4.2.1. Cenário CONAMA	120
4.2.2. Cenário SEMA	127
4.2.3. Cenário União Europeia.....	134
4.3. SUMÁRIO DOS RESULTADOS	139
4.3.1. Particulado Total em Suspensão	139
4.3.2. Dióxido de Nitrogênio.....	143
5. CONCLUSÃO	147
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151

1. INTRODUÇÃO

Uma somatória de acontecimentos nos últimos dois séculos evidenciou a questão da poluição atmosférica. A criação da máquina a vapor, e a exploração do carvão propiciaram o desenvolvimento das indústrias. Com a industrialização, houve uma grande demanda de mão de obra nas cidades. Esse desenvolvimento culminou na aglomeração de pessoas nos centros urbanos. Esses dois fatores, industrialização e urbanização, somados a falta de controle de emissões atmosféricas, propiciaram a ocorrência de eventos críticos de poluição do ar, acarretando em óbitos e efeitos crônicos na saúde da população. Para evitar a repetição desses acontecimentos, medidas começaram a ser tomadas pelo poder público de diversos países, visando a restrição da emissão de poluentes. Com o passar dos anos, cada país estabeleceu a sua forma de limitar as emissões das indústrias. No Brasil, atualmente, há duas legislações principais que estabelecem os limites de emissão por fontes pontuais: a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de nº 382, do ano de 2006 e a de nº 436, do ano de 2011. Ambas baseiam-se, principalmente, em uma concentração limite de poluentes medidos em chaminé. Alguns fatores importantes como a vazão de emissão, localização da indústria, altura da chaminé e topografia não são levadas em consideração. Esse estudo visa avaliar a efetividade dessas resoluções, bem como de outras regulamentações de emissão, na manutenção da qualidade do ar nos padrões da normativa nacional (Resolução CONAMA nº 03 de 1990), tendo como exemplo as emissões atmosféricas das indústrias de cerâmica vermelha (olarias) do sul de Santa Catarina.

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a efetividade de padrões de emissão para a indústria cerâmica na proteção da qualidade do ar, tendo como estudo de caso as emissões das olarias do sul do estado de Santa Catarina.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Inventariar uma base de dados de emissão das olarias do Sul de Santa Catarina;

- Desenvolver cenários de emissão (diferentes limites de emissão, contaminantes e escalas temporais) para a aplicação de um modelo de dispersão de poluentes atmosféricos (AERMOD);
- Avaliar, para diferentes cenários, o impacto das emissões na qualidade do ar com bases nos limites estabelecidos pelo CONAMA, SEMA/PR, Índia, União Europeia e Estados Unidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A ATMOSFERA

As primeiras pesquisas científicas sobre a composição química da atmosfera remontam ao século XVIII, com cientistas como Antoine-Lauren Lavoisier, Joseph Priestley e Henry Cavendish. Devido às pesquisas desses cientistas, os químicos e físicos do século seguinte conseguiram identificar os principais componentes da atmosfera: nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) e os gases nobres. No final do século XIX, as pesquisas voltaram-se aos constituintes traços da atmosfera, possuindo fração molar abaixo de 1 ppm_v (parte por milhão em volume). Ficou evidente a presença expressiva de elementos traços na atmosfera, que podem ser vinculados a processos geológicos, químicos, biológicos e antropogênicos (SEINFELD e PANDIS, 2006).

O Quadro 1 apresenta a composição do ar padrão, que é meramente conceitual.

Quadro 1 - Constituintes da atmosfera não poluída seca (a 25 °C e 1 atm).

Gases constituintes da atmosfera (base seca)	Concentração (ppm_v)
Nitrogênio	780.000,00
Oxigênio	209.400,00
Água	-
Argônio	9.300,00
Dióxido de Carbono	315,00
Néon	18,00
Hélio	5,20
Metano	1,20
Criptônio	1,00
Óxido Nitroso	0,50
Hidrogênio	0,50
Xenônio	0,08
Vapores Orgânicos	0,02

Fonte: Adaptado de Vallero (2008)

Os valores apresentados no quadro são apenas indicativos, pois há uma grande variabilidade da composição da atmosfera, seja ela espacial ou temporal.

Conforme Vallero (2008), a composição do ar “puro” nunca será conhecida, pois quando começaram as investigações acerca da

constituição do ar, a humanidade já estava alterando a composição da atmosfera há milhares de anos. Mesmo nas localidades mais afastadas, como desertos, montanhas e os polos, o ar é considerado diluidamente poluído. Quando se fala de poluição, há o costume de atrelar a sua ocorrência a fenômenos antropogênicos. Entretanto, uma grande parte da poluição atmosférica tem origem natural (MIDDLECAMP *et al.*, 2011). Ela pode ser proveniente de erupções vulcânicas, ressuspensão do solo, queimadas naturais, etc.

2.2. POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A definição de poluição do ar, conforme o catálogo de vocabulário de termos ambientais da Agência Estadunidense de Proteção Ambiental (USEPA, 2009a), é a presença de contaminantes ou substâncias poluentes no ar que interferem na saúde ou bem estar humano ou produzem outros efeitos nocivos ao ambiente.

Conforme a USEPA (2012a) os poluentes podem ser classificados em poluentes criteriosos (*Criteria Air Pollutants – CAP*) e poluentes perigosos (*Hazardous Air Pollutants – HAP*). Os CAP são: material particulado, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, chumbo e ozônio. São chamados de criteriosos porque são regulamentados por critérios baseados na saúde humana e/ou do ambiente (critérios científicos) para o estabelecimento de concentrações aceitáveis desses poluentes no ambiente. Já os HAP são conhecidos ou são suspeitos de causar câncer e outros efeitos graves à saúde, como alterações no sistema reprodutivo, malformações congênitas, ou efeitos ambientais adversos. Ao todo nos HAP são considerados 187 poluentes, que incluem substâncias orgânicas (benzeno, diclorometano, tolueno, etc.) e metais como cromo e cádmio. A seguir, serão abordados os poluentes atmosféricos que serão tratados nesse trabalho.

2.2.1. Material particulado

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2009b) o material particulado (MP) representa uma classe ampla de substâncias química e fisicamente diferentes (líquidas ou sólidas). Essas partículas podem ser classificadas de acordo com seu tamanho, mecanismo de formação, origem, composição química, comportamento atmosférico e método de medição (USEPA, 2012b).

a. Classificação pelo tamanho

A classificação mais utilizada é a de acordo com o tamanho. Dentre essas classificações, a de diâmetro aerodinâmico é a mais usual. O diâmetro aerodinâmico é adotado devido ao fato que as partículas quase nunca possuem um formato esférico regular. É feita, portanto, uma equivalência da partícula real a uma partícula perfeitamente esférica de densidade de 1000 kg.m^{-3} quanto às suas propriedades inerciais e aerodinâmicas. Todas as referências ao diâmetro das partículas neste trabalho serão ao diâmetro aerodinâmico. A classificação mais utilizada no Brasil, feita pela Companhia Ambiental de São Paulo (CETESB, 2014a), está descrita no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação do material particulado conforme a CETESB.

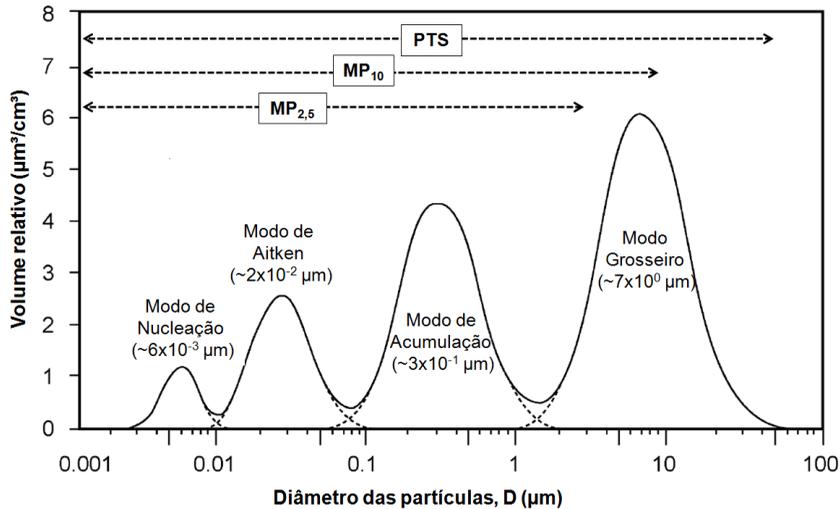
Nomenclatura	Sigla	Diâmetro aerodinâmico
Partículas totais em suspensão	PTS	$D_A < 50 \mu\text{m}$
Partículas inaláveis	MP ₁₀	$D_A < 10 \mu\text{m}$
Partículas inaláveis finas	MP _{2,5}	$D_A < 2,5 \mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de CETESB (2014a)

Embora no Brasil ainda seja levada em consideração a classificação de particulado total em suspensão (PTS), nos países desenvolvidos usam-se os conceitos de material particulado inalável (MP₁₀) e material particulado inalável fino (MP_{2,5}) que estão atrelados a efeitos adversos à saúde.

A distribuição de partículas, no que se diz respeito ao tamanho, é um importante parâmetro físico que governa o comportamento das mesmas. Seja a distribuição de partículas referente à concentração mássica, numérica ou volumétrica, ela é log-normal. Atualmente, admite-se a existência de 4 modos na distribuição de partículas, o que significa que há 4 picos identificáveis quando é feita a avaliação da distribuição de partículas no ambiente, de acordo com o diâmetro. Esses modos são: o de nucleação; o de Aitken; o de acumulação; e o grosseiro (USEPA, 2004a). Tais modos podem ser observados na Figura 1, que representa uma distribuição idealizada de partículas.

Figura 1 -Distribuição hipotética log-normal do volume relativo das partículas em função do diâmetro aerodinâmico.



Fonte: Adaptado de USEPA (2004a).

Conforme a USEPA (2004a) o modo de nucleação é composto por partículas recentes, com diâmetros abaixo de 10 nm. O limite inferior desse modo é incerto, pelo fato das técnicas atuais apenas conseguir mensurar partículas até os 3 nm.

O modo de Aitken compreende partículas entre 10 e 100 nm de diâmetro. As partículas desse modo podem se originar do crescimento de partículas do modo de nucleação ou pela nucleação de elevadas concentrações de substâncias precursoras (USEPA, 2004a). São esses dois primeiros modos os responsáveis pelo maior número de partículas. Entretanto, correspondem a um percentual irrisório na massa do MP (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Segundo a USEPA (2004a) o modo de acumulação compreende partículas entre 0,1 µm até pouco acima do diâmetro onde ocorre o mínimo da distribuição de massa e volume das partículas (em torno de 1 e 3 µm). São essas partículas as responsáveis pela maior parte da área específica do material particulado. Conforme o Departamento de Meio Ambiente, Alimentos e Assuntos Rurais do Reino Unido (*United Kingdom Department for Environment, Food and Rural Affairs - UKDEFRA*, 2001) nesta faixa de diâmetros as partículas tem a maior tendência a absorver/adsorver gases, o que torna esse modo o principal alvo de estudos epidemiológicos. O modo é chamado de acumulação,

pois os mecanismos de remoção são menos eficientes nessa faixa de diâmetros, fazendo com que essas partículas tenham um tempo de residência maior na atmosfera, quando comparado aos outros modos (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Já partículas grosseiras são consideradas todas as que se situam acima de 1-3 μm de diâmetro (USEPA, 2004a). O modo grosseiro consiste de partículas resultantes da quebra de materiais de maior tamanho, incluindo poeira ressuspensa do solo, partículas provenientes de atividades de construção civil e o *spray* marinho. Pelo fato de terem maiores proporções, permanecem por pouco tempo na atmosfera. Entretanto, contribuem de maneira significativa à massa de material particulado, quando esse é medido próximo à fonte (UKDEFRA, 2001).

b. Processos de Formação

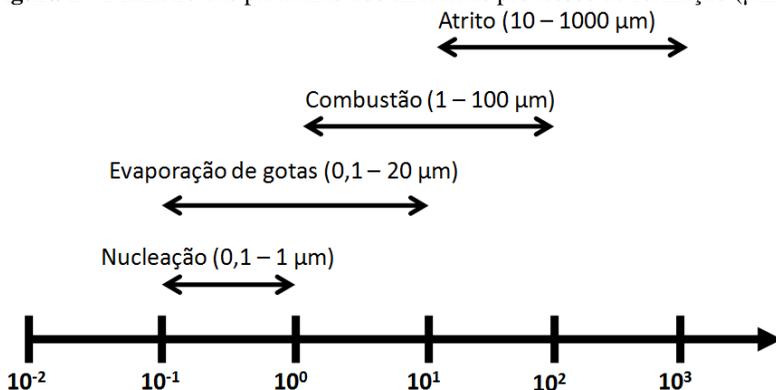
O material particulado pode ser formado por quatro processos diferentes (USEPA, 2010): atrito/dispersão mecânica, combustão, nucleação homogênea e heterogênea, e evaporação de gotas.

- I. Atrito/dispersão mecânica: ocorre quando há a fricção de duas superfícies. A composição química e densidade das partículas geradas serão idênticas a dos materiais de origem. As partículas formadas por esse processo situam-se numa faixa de aproximadamente 1 μm até 1000 μm de diâmetro. Entretanto, poucas partículas situam-se na faixa abaixo de 10 μm devido à baixa quantidade de energia normalmente envolvida nesses processos. Há principalmente, a geração de partículas grosseiras (USEPA, 1999);
- II. Combustão: quando há a queima de combustíveis (sólidos e líquidos), ocorre a oxidação ou vaporização das substâncias orgânicas presentes nos mesmos. Rapidamente, as moléculas do combustível são reduzidas a cinzas e remanescentes de queima lenta (compostos por substâncias orgânicas). Essas cinzas e remanescentes encontram-se numa faixa de 1 a 100 μm de diâmetro, constituindo o particulado resultante desse processo de combustão (USEPA, 1999). Segundo a USEPA (1998 *apud* ARBEX, 2001) o maior percentual de material particulado produzido pela queima da biomassa é formado por partículas inaláveis finas (menores que 2,5 μm) em uma proporção de aproximadamente 90%;

- III. Nucleações: as nucleações heterogênea e homogênea envolvem a conversão de vapores para a forma de partículas. Para tal, os vapores devem resfriar até uma temperatura em que a nucleação possa ocorrer. A diferença entre as nucleações é que na homogênea, a partícula formada é composta quase em sua totalidade pelo vapor predecessor. Já na heterogênea, há a acumulação de um material na superfície da partícula, resultando num composto com mais de um elemento químico. Há duas categorias de vapores que podem ocasionar a nucleação: (1) os compostos orgânicos; e (2) os metais inorgânicos e compostos metálicos. As nucleações resultam em partículas finas de diâmetro entre 0,1 e 1 μm (USEPA, 2010);
- IV. Evaporação de gotas: é um processo de formação de particulado muito próximo da combustão. Quando a água é evaporada, os sólidos em suspensão contidos nas gotas são emitidos como pequenas partículas. O tamanho delas situa-se numa faixa de 0,1 a 20 μm .

A Figura 2 apresenta a faixa de tamanho de partículas que os diferentes processos de formação de MP acarretam.

Figura 2 - Diâmetro das partículas dos diferentes processos de formação (μm).



Fonte: Adaptado de USEPA (2010).

Ainda quanto à formação, o MP pode ser classificado como primário ou secundário (USEPA, 1999):

- Primário é aquele emitido diretamente na atmosfera ou que é formado rapidamente a partir da condensação de vapores.
- Secundário refere-se às partículas que são formadas na atmosfera devido a reações entre gases precursores. Os principais gases precursores são o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃) e os compostos orgânicos voláteis (COV).

c. Processos de Remoção

Conforme Seinfeld e Pandis (2006) os processos de remoção, juntamente com a distribuição geográfica desuniforme das fontes de emissão, são os principais responsáveis pela grande variabilidade em concentração e composição de aerossóis na Terra. Enquanto os gases possuem tempos de residência que variam de menos de um segundo até séculos, a permanência de partículas na troposfera (camada mais baixa da atmosfera) varia de poucos dias até poucas semanas.

São três os principais mecanismos de remoção do material particulado da atmosfera: a remoção úmida (por meio de precipitação), remoção seca (ou sedimentação), e a deposição oculta (assim chamada por ter sido desconsiderada nos estudos em que se determinaram os fenômenos anteriores). A deposição oculta ocorre por meio da interceptação de partículas por nevoeiros, nuvens e neblinas (USEPA, 2004a).

Conforme Vallero (2008), a deposição úmida é função principalmente da precipitação e da concentração de poluentes no ar. Ela pode ocorrer por ação das gotículas no interior das nuvens (liquefação – *rainout*), ou abaixo das nuvens (lavagem – *washout*).

Já a deposição seca, de acordo com Seinfeld e Pandis (2006), é resultado majoritariamente da turbulência atmosférica (principalmente na camada mais próxima ao solo), das propriedades físico-químicas (densidade e formato) da partícula e da natureza da superfície sob a qual ela se deposita (uma superfície “lisa” pode levar ao ricocheteio de partículas).

d. Composição Química

O material particulado apresenta uma considerável variabilidade de elementos em sua composição, chegando a ser constituído por centenas de compostos ou substâncias químicas diferentes. As frações

finas e grosseiras do MP possuem diferenças marcantes em sua composição química. Em geral, a fração grosseira ($D > 2,5 \mu\text{m}$) é básica, e a fina ($D < 2,5 \mu\text{m}$), ácida (BOUÇAS, 2009). Tal variabilidade de composição dependerá da origem do MP, do seu processo de formação e das interações que o mesmo sofre na atmosfera.

A formação, a origem e a composição química do MP são bastante diversificadas em um ambiente urbano. Além disso, sua concentração varia espacialmente e temporalmente em decorrência das condições meteorológicas e reações químicas na atmosfera (CALLÉN 2009, *apud* HOINASKI, 2010).

Conforme Bouças (2009) a fração fina do material particulado apresenta em sua composição, além de carbono elementar, íons como o sulfato (SO_4^-), nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+) e hidrônio (H^+). Uma variedade de metais também é encontrada nessa fração, como o chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), vanádio (V) e cromo (Cr). Já a fração grosseira normalmente é formada principalmente por partículas de origem mineral, compostas por silício (Si), alumínio (Al), potássio (K), ferro (Fe), cálcio (Ca) e outros, como carbonatos e compostos orgânicos.

Entretanto, o potássio e o nitrato podem ser encontrados, tanto na fração fina quanto na grosseira. Isso ocorre devido às diferentes origens desses materiais. O potássio proveniente do solo faz parte da fração grosseira das partículas, ao contrário do que se origina das emissões da queima da madeira e do cozimento de carnes (em ambientes internos). O nitrato da fração fina deriva da reação do ácido nítrico e a amônia (ambos em fase gasosa), resultando em nitrato de amônio. Já o nitrato da fração grosseira advém da reação do ácido nítrico (em fase gasosa) com partículas grosseiras (USEPA, 2004a).

2.2.2. Óxidos de nitrogênio

O nitrogênio gasoso (N_2) é o principal constituinte do ar, em torno de 78% em volume e 75% em massa (ar seco). Em condições normais é um gás inerte. Entretanto, quando é submetido a elevadas temperaturas e pressões (encontradas no interior de câmaras de combustão, fornos, etc.) o nitrogênio reage com o oxigênio e se converte em monóxido de nitrogênio (NO) e em dióxido de nitrogênio (NO_2), que é nocivo à saúde (GODISH, 1991).

A Tabela 1 apresenta valores típicos de concentração de NO_x (soma das concentrações do NO com o NO_2) na camada limite¹ para diferentes ambientes, demonstrando a influência de emissões antrópicas desse poluente.

Tabela 1 - Concentrações típicas de NO_x na camada limite.

Região	Concentração de NO_x (ppb_v)
Urbana-suburbana	10-1000
Rural	0,2-10
Floresta tropical remota	0,02-0,08
Ambiente marinho remoto	0,02-0,04

Fonte: Adaptado do *National Resource Council* (1991 apud Seinfeld e Pandis, 2006).

A Tabela 2 apresenta uma estimativa das principais fontes de emissão anual de NO_x na troposfera.

Tabela 2 - Principais fontes de NO_x .

Fontes	Emissão de NO_x (TgN.ano⁻¹)	% do total
Queima de combustíveis fósseis	33,0	63,6%
Aeronaves	0,7	1,3%
Queima de biomassa	7,1	13,7%
Solo	5,6	10,8%
Oxidação da amônia	-	-
Raios	5,0	9,6%
Estratosfera	<0,5	<1,0%
Total	51,9	100%

Fonte: Adaptado do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2001).

De acordo com Vallero (2008) o óxido nítrico é um gás inodoro, incolor e insolúvel em água. Já o dióxido de nitrogênio possui um cheiro forte de ácido e, de certa forma é solúvel em água.

Aproximadamente, 90 a 95% dos óxidos de nitrogênio gerados em processos de combustão saem sob a forma de monóxido de nitrogênio. Na atmosfera, o NO emitido é rapidamente convertido, por meio de reações fotoquímicas, a dióxido de nitrogênio. São duas as

¹ É a camada da atmosfera mais próxima da superfície terrestre, tendo seu comportamento diretamente influenciado pelo seu contato com a crosta.

principais fontes de nitrogênio para a emissão de seus óxidos: a atmosfera (chamados de NO_x térmicos); e os provenientes da composição dos combustíveis (VALLERO, 2008).

Conforme Seinfeld e Pandis (2006) há ainda outra forma de se tratar os NO_x , chamado de nitrogênio reativo (NO_Y). Além do NO e NO_2 , compreende todos os compostos que são produtos da oxidação atmosférica do NO_x . Estão incluídos nessa classificação: ácido nítrico (HNO_3), ácido nitroso (HONO), íon nitrato (NO_3^-), dentre outros. Essa classificação é feita pelo fato de possuir uma concentração mais conservadora que os NO_x (por abranger mais compostos), sendo que a fração de seus constituintes é uma boa base para se identificar a interconversão entre as espécies que compõem o NO_Y .

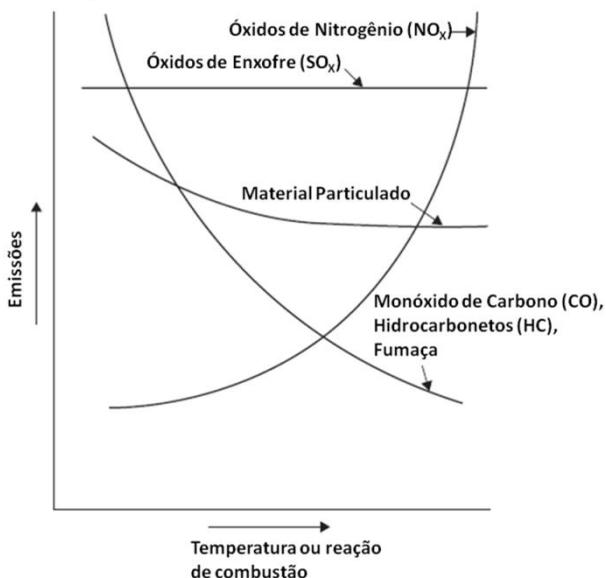
Segundo Baird (2002) o óxido nítrico é pouco solúvel em água, mas à medida que o mesmo é oxidado a NO_2 e entra em contato com a água, ocorre a formação do ácido nítrico (HNO_3). O ácido nítrico pode ser formado durante o dia, por meio de reações fotoquímicas ou durante a noite, produzido com o ozônio disponível (GODISH, 1991). Tal ácido pode então ser absorvido na água e precipitar, ocasionando a chuva ácida, ou pode, posteriormente, reagir com a amônia presente na atmosfera e formar material particulado. De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2005) na presença de luz ultravioleta e de hidrocarbonetos, o dióxido de nitrogênio é a principal causa da formação de ozônio troposférico e de aerossóis de nitrato, que consistem numa importante fração do $\text{MP}_{2.5}$.

Apesar da toxicidade do NO e do NO_2 , as concentrações de NO_x no ambiente, usualmente se encontram em valores muito abaixo daqueles que possam levar à efeitos adversos à saúde. Isso se deve ao fato das reações relativamente rápidas que ocorrem quando os NO_x são lançados à atmosfera. Entretanto, o dióxido de nitrogênio é o gás responsável por absorver a luz solar necessária às reações fotoquímicas de geração de ozônio troposférico. Por isso, a regulamentação dos NO_2 está mais voltada ao impedimento de formação de ozônio na camada mais baixa da atmosfera do que à redução dos efeitos causados diretamente pelos NO_2 a saúde (VALLERO, 2008).

No caso da combustão, as emissões de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio estão intimamente relacionadas (de maneira inversa). A emissão deles depende da eficiência da combustão. Caso haja maior admissão de ar, há um aumento da eficiência da queima (gerando menos CO). Entretanto, tal fato potencializa as emissões de NO_x (devido ao aumento da temperatura e da quantidade de nitrogênio

disponível). Já quando a taxa ar/combustível é menor, a combustão não é eficiente, ocasionando um acréscimo na emissão de monóxido de carbono. A Figura 3 apresenta a maneira que a emissão dos poluentes varia com o aumento da temperatura de combustão para uma situação hipotética.

Figura 3 - Emissão de poluentes na combustão.



Fonte: Adaptado de Vallero (2008)

2.3. EFEITOS À SAÚDE PROVOCADOS PELOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Segundo Kampa e Castanas (2008 *apud* MARTINS, 2010), todos os tipos de poluentes atmosféricos em altas concentrações são prejudiciais à saúde (efeitos a curto prazo - agudos). Porém, um longo tempo de exposição a concentrações baixas de poluentes (efeitos crônicos) também podem causar o mesmo dano.

No caso do material particulado, a principal preocupação está ligada às partículas menores, pois tendem a ficar mais tempo na atmosfera e no corpo humano. A redução do lançamento dessas partículas nos processos de tratamento é difícil. Trata-se de sério problema à saúde uma vez que podem ultrapassar o trato respiratório superior humano, chegando aos alvéolos pulmonares, causando uma

série de complicações. Devido a sua elevada superfície específica, essas partículas de tamanho diminuto podem carregar metais pesados consigo. Os agentes tóxicos metálicos possuem característica cumulativas, por serem estáveis. Assim, mesmo em baixas concentrações podem levar ao aparecimento de sinais crônicos, quando expostos por um longo período. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2005), até aquele momento nenhuma pesquisa encontrara limites abaixo dos quais não haja efeitos adversos à saúde causados pelo material particulado.

Sabe-se que as concentrações de partículas no ar ambiente estão associadas a uma ampla gama de efeitos sobre a saúde humana. Algumas consequências são: o aumento de internações hospitalares por patologias respiratórias, a exacerbação de episódios de asma, o aumento da incidência e da duração de sintomas respiratórios, o decréscimo da função pulmonar, a restrição de atividades de trabalhadores, o aumento do absenteísmo escolar, além do aumento da mortalidade (ARBEX, 2001).

Conforme estudo de Pope et al. (2004, apud COELHO, 2009) um incremento de apenas $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ de $\text{MP}_{2,5}$ foi associado a um aumento de 8 até 18% no risco de mortalidade por doenças cardiopulmonares em áreas metropolitanas dos Estados Unidos. No mesmo estudo, foi estimado que uma redução da mesma magnitude no período de dois anos, seria responsável por um aumento de expectativa de vida de 0,61 anos, em média.

Exposições de curto prazo a concentrações de NO_2 acima de $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ apresentam toxicidade significativa, com prejuízos à saúde. Não há nenhuma evidência robusta de que o NO_2 tenha algum efeito tóxico direto em exposições em longo prazo, pois o poluente é sempre encontrado em conjunto com outras substâncias. Portanto, não se consegue isolar o efeito do NO_2 . Ele é utilizado como parâmetro porque serve como indicador da presença de outros contaminantes (como o MP e ozônio). Até hoje, estudos epidemiológicos mostraram que os sintomas de bronquite se agravam em crianças asmáticas com o aumento de concentrações anuais de NO_2 . Também há uma correlação entre a redução da função pulmonar com altas concentrações do mesmo poluente (OMS, 2005). De acordo com Vallero (2008) a exposição a concentrações elevadas de NO_2 ocasiona um aumento na suscetibilidade à patógenos respiratórios. O Quadro 3 demonstra os poluentes atmosféricos apresentados até aqui e seus efeitos adversos à saúde.

Quadro 3 - Efeitos provocados pelos poluentes na saúde.

Poluente	Mecanismo	Efeitos Potenciais na Saúde
Material Particulado (MP)	<ul style="list-style-type: none"> • Agudo: irritação nos brônquios, inflamação e aumento da reatividade; • Redução da limpeza mucociliar; • Resposta reduzida dos macrófagos e redução na imunidade local; • Reação fibrótica; • Desequilíbrio autônomo, atividade pró-coagulante, estresse oxidativo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Pieira, exacerbação da asma; • Infecções respiratórias; • Bronquite crônica e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC); • Exacerbação da DPOC; • Excesso de mortalidades, incluindo de doenças cardiovasculares;
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Exposição aguda aumenta a reatividade bronquial; • Exposição crônica aumenta suscetibilidade à infecções virais e bacterianas nos pulmões; 	<ul style="list-style-type: none"> • Pieira, exacerbação da asma; • Infecções respiratórias; • Redução da função pulmonar (crianças);

Fonte: Adaptado de OMS (2002)

2.4. LEGISLAÇÃO REGULATÓRIA SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

No âmbito da poluição atmosférica, duas linhas regulatórias são tomadas no sentido de proteger a qualidade do ar. A primeira é a restrição da emissão de poluentes, conhecido como padrão de emissão. A segunda linha regulatória são as concentrações de contaminantes permitidas no ar ambiente (ou padrões de qualidade do ar).

De acordo com Vallero (2008) os padrões de emissão podem ser classificados como subjetivos e objetivos. Os padrões subjetivos dependem da parte sensorial do ser humano (visão, olfato, etc.). Já os objetivos baseiam-se em medições físicas ou químicas. Um exemplo dos padrões subjetivos é a densidade colorimétrica (escala Ringelmann), cuja medição é realizada comparando-se a cor de uma pluma com uma escala de cores.

As regulamentações podem requerer o mesmo limite de emissão para todas as fontes, independente do tamanho e capacidade ou pode não levar esses fatores em consideração.

Freedman (2003) afirma que a maioria das regulamentações de padrões de emissões não estimula o aumento da eficiência energética de

processos, pois se baseiam na emissão por quantidade de combustível consumido, ou simplesmente na concentração. Outra forma de se regulamentar, exigindo a aplicação das melhores tecnologias disponíveis (BAT - *Best Available Technologies*) ou na menor emissão alcançável (LAER - *Lowest Achievable Emission Rate*) estabelecem metas independentes da eficiência do sistema produtivo. Controversamente, padrões de emissão dependentes de dados de saída (*output based standards*) encorajariam a eficiência energética, devido ao fato dela diretamente afetar as emissões.

Conforme Vallero (2008) outros critérios podem ser considerados para o estabelecimento de padrões de emissão: qualidade do ar, padrões de qualidade do ar, número e localização de fontes, meteorologia e topografia.

Os padrões de qualidade do ar são as concentrações aceitáveis de poluentes no ar. Conforme a OMS (2005) eles variam de acordo com a abordagem adotada para considerar diversos fatores: riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas, dentre outros. Tais fatores estão estritamente relacionados com o nível de desenvolvimento e da capacidade de cada Estado gerenciar a qualidade do ar. Normalmente, os padrões de qualidade do ar são regulamentados em duas escalas temporais, uma curta (por exemplo, horária, diária) e outra longa (usualmente anual). Isso se deve ao fato dos poluentes causarem efeitos à saúde em curto prazo (agudos) e em longo prazo (crônicos).

2.4.1. Padrões de emissão no Brasil

No Brasil, o início das restrições de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas deu-se início com o Decreto-Lei nº 1.413, de agosto de 1975, prosseguindo com o Decreto nº 76.389, de outubro de 1975 (que regulamentou o Decreto-Lei) e, posteriormente, com a Lei nº 6.803 de 1980 (PEREIRA JR., 2007). Essas regulamentações trabalharam essencialmente com questões conceituais e delegação de responsabilidades. Apesar de não estabelecerem nenhum limite de emissão, nesses atos as indústrias foram responsabilizadas pela promoção de ações visando o controle da poluição. Por meio dessas normas, designou-se a identificação de áreas críticas de poluição, bem como a delimitação zonas para uso industrial, dentre outros. Ou seja, forneceram diretrizes para a localização de complexos industriais para reduzir o impacto causado ao ambiente.

Houve mais um passo no estabelecimento de limites de emissão de poluentes com um dos desfechos da Política Nacional do Meio Ambiente de 1981: o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). Ele foi instituído com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) número 5, do ano de 1989. Conforme Pereira Jr. (2007) o PRONAR seguiu tendências internacionais, sendo um programa pioneiro no país. Este programa estabeleceu metas e instrumentos de ação, inclusive a elaboração do inventário nacional de fontes de poluição do ar e a delimitação de áreas críticas de poluição.

Um dos instrumentos do PRONAR foi o estabelecimento dos limites máximos de concentrações de emissão. Essa seria a estratégia básica de controle de poluição atmosférica, relegando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar. A regulamentação efetivamente ocorreria no ano de 1990, com a Resolução nº 8, estabelecendo os limites máximos de emissão. Foram regulamentados então, os processos de combustão de fontes fixas considerando os seguintes: caldeiras, geradores de vapor, centrais para a geração de energia elétrica, fornos; fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores. Essa Resolução ficou restrita a fontes novas (que seriam instaladas após 1990).

Os poluentes considerados pela Resolução nº 8 foram o material particulado (MP), o dióxido de enxofre (SO₂) e a fumaça (densidade colorimétrica). As restrições variaram de acordo com a classificação da área em que o emissor estava localizado, a potência térmica nominal do equipamento de queima e o combustível empregado. A Resolução tratava apenas sobre a emissão da queima do óleo combustível e do carvão mineral. Processos de combustão externa que empregassem outros combustíveis deveriam ser regulamentados pelos órgãos estaduais de meio ambiente.

A classificação das áreas onde os empreendimentos emissores estavam situados era de responsabilidade dos estados e deveria ser dividida em áreas de classe I, II ou III. As áreas de classe I correspondiam a locais atmosféricamente preservados, ou seja, as unidades de conservação (onde seria proibida qualquer atividade que gerasse contaminação atmosférica). Áreas a serem conservadas, como as destinadas a turismo, lazer (estâncias climáticas, hidrominerais e hidrotermais) também foram qualificadas como classe I, entretanto admitiriam emissão de poluentes (CONAMA, 1989). Áreas de classe II admitiriam emissões, assim como as áreas de classe III. O Quadro 4 apresenta os valores limites de emissão da Resolução nº 8, de 1990, em

função da potência térmica nominal e da classe do local em que o emissor estaria instalado.

Quadro 4 - Padrões de emissão da Resolução 08/1990 do CONAMA.

Potência térmica nominal	Área	Emissão máxima de MP (g.10 ⁻⁶ kcal)	Emissão máxima de SO ₂ (g.10 ⁻⁶ kcal)
≤ 70 MW	Classe I	120	2.000
	Classe II e III	350 e 1.500 ²	5.000
> 70 MW	Classe I	-	-
	Classe II e III	120 e 800 ²	2.000

Fonte: Adaptado de CONAMA (1990a)

Na Resolução n. 08/1990, os limites de emissão estavam estritamente vinculados a quantidade de calor gerado pelo processo, ou seja, ao consumo de combustível.

Em 1999 foi publicada a Resolução n° 264, do CONAMA, que tratou das emissões atmosféricas provenientes do coprocessamento de resíduos na produção de clínquer (indústria do cimento). Os poluentes regulamentados e seus valores limite de concentração estão dispostos no Quadro 5.

² O valor mais elevado para o uso carvão mineral e o menor para óleo combustível.

Quadro 5 - Padrões de emissão para o coprocessamento de resíduos na produção de cimento - Resolução nº 264/99 do CONAMA.

Poluente	Limite máximo de emissão (a 7% de oxigênio e base seca)³
Ácido Clorídrico (HCl)	1,8 kg/h ou 99% de redução
Ácido Fluorídrico (HF)	5 mg.Nm ⁻³
CO	100 ppm _v
MP	70 mg.Nm ⁻³ (farinha seca) ⁴
Hidrocarbonetos Totais (HCT)	20 ppm _v
Mercúrio (Hg)	0,05 mg.Nm ⁻³
Chumbo (Pb)	0,35 mg.Nm ⁻³
Cádmio (Cd)	0,10 mg.Nm ⁻³
Tálio (Tl)	0,10 mg.Nm ⁻³
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg.Nm ⁻³
(As+Be+Co+Ni+Pb+Sb+Se+Sn+Te+Zn)	7,0 mg.Nm ⁻³

Fonte: Adaptado de CONAMA (1999).

Outra resolução que limita a emissão de poluentes por fontes pontuais é a Resolução nº 316/2002, do CONAMA. Ela estabelece os valores máximos de contaminantes emitidos pela incineração de resíduos. Essa e a Resolução 264/99 são as únicas resoluções de emissão atmosférica do CONAMA que mencionam o emprego de estudos de dispersão de poluentes atmosféricos.

Uma atualização nos padrões de emissão foi realizada apenas no ano de 2006. Nesse ano o CONAMA publicou a Resolução 382, na qual os tipos de fonte foram especificados, como também a gama de combustíveis considerados na regulamentação foi ampliada. Os poluentes a serem averiguados também sofreram atualização, o MP continuou, os óxidos de nitrogênio (NO_x) foram incluídos, o dióxido de enxofre foi substituído pelos óxidos de enxofre (SO_x) e a densidade colorimétrica foi mantida apenas para processos que utilizam derivados da madeira para a combustão. Devido a adição tipos de fontes regulamentadas, o número de poluentes com restrição de emissão também aumentou (Pb, F, NH₃, dentre outros). Essa regulamentação se aplica às fontes fixas já instaladas, ou com pedido de licença de instalação anterior ao dia 02 de fevereiro de 2007 (data de publicação dessa Resolução).

³ mg.Nm⁻³: Concentração de poluente ajustada para as condições normais de temperatura e pressão (0 °C e 1 atm).

⁴ Corrigido para 11% de O₂.

A Resolução CONAMA n. 382/2006 foi resultado do processo nº 02000.000921/2002-78, instaurado pela 70ª Reunião da Câmara Técnica Permanente de Controle Ambiental no dia 8 de agosto de 2002. Essa reunião determinou a formação do Grupo Técnico (GT) para estabelecer os padrões de emissão (CONAMA, 2002). O GT foi constituído por membros de diversos setores interessados na regulamentação das emissões. Desde instituições privadas (como Gerdau, Usiminas, Bunge, DaimlerChrysler, etc.), organizações industriais (Associação Brasileira do Alumínio, Confederação Nacional das Indústrias), instituições públicas (Instituto Ambiental do Paraná, Companhia Ambiental de São Paulo, Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais, etc.) até entidades do terceiro setor. Foram criados grupos menores, que ficaram responsáveis de propor limites de emissão para o GT. Os subgrupos foram liderados pelas instituições estaduais do meio ambiente correspondentes, para discutir os limites de emissão para atividades industriais preponderantes em seu estado, como por exemplo: caldeiras a gás natural e liquefeito de petróleo (Rio de Janeiro); caldeiras a bagaço de cana (São Paulo); caldeiras a madeira e derivados (Paraná); turbinas a gás (Rio de Janeiro); fusão de chumbo (São Paulo); cimenteiras (Rio de Janeiro); siderúrgicas (Minas Gerais); e etc. (CONAMA, 2003). Ao todo, foram necessárias onze reuniões e pouco mais de dois anos e quatro meses para que o documento final fosse aprovado pelo grupo (CONAMA, 2005a).

Na Resolução 382, foi importante o estabelecimento de uma condição padrão para a apresentação de resultados da amostragem de poluentes, evitando a manipulação de dados. Correções devem ser feitas para a temperatura, pressão (condições normais de temperatura e pressão - CNTP: 0 °C e 1 atm), umidade (base seca) e a concentração de oxigênio (específica para cada fonte). O Quadro 6 elenca as atividades e poluentes regulamentados pela Resolução CONAMA nº 382/2006.

Quadro 6 - Atividades e poluentes regulamentados pela CONAMA 382/06.

Atividades	Anexo na CONAMA 382/2006	Poluentes regulamentados	Faixas de Potência Nominal (MW)
Geração de calor por combustão de óleo combustível	Anexo I	MP, NO _x e SO _x ⁵	P <10 10 ≤ P ≤ 70 P >70
Geração de calor por combustão de gás natural	Anexo II	NO _x	P <70 P ≥ 70
Geração de calor por combustão de bagaço da cana-de-açúcar	Anexo III	MP e NO _x ⁵	P <10 10 ≤ P ≤ 75 P >75
Geração de calor por combustão de derivados da madeira	Anexo IV	MP e NO _x ⁵	P <10 10 < P <30 30 < P <70 P ≥ 70
Turbinas a gás para a geração de energia elétrica	Anexo V	NO _x , CO, SO _x e MP	N.A. ⁶
Refinarias de petróleo⁷	Anexo VI	MP, NO _x , SO _x , NH ₃ , H ₂ S	N.A.
Fabricação de celulose⁷	Anexo VII	MP, NO _x , SO _x , ERT, NH ₃ , H ₂ S ⁸	N.A.
Indústrias de fusão secundária de chumbo⁷	Anexo VIII	MP, SO _x e Pb	N.A.
Indústrias de alumínio primário⁷	Anexo IX	MP e F ⁸	N.A.
Fornos de fusão de vidro	Anexo X	MP, NO _x e SO _x ⁸	N.A.
Indústrias de cimento Portland⁷	Anexo XI	MP e NO _x	N.A.
Produção de fertilizantes, ácido fosfórico, sulfúrico e nítrico⁷	Anexo XII	NH ₃ , F, MP, SO ₂ , SO ₃ , NO _x ⁸	N.A.
Indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro⁷	Anexo XIII	MP, SO ₂ e NO _x ⁸	N.A.

Fonte: Adaptado de CONAMA (2006).

⁵ Pode ser considerado apenas o CO para potências reduzidas.

⁶ Não aplicável

⁷ Mais de uma atividade é regulamentada para esse tipo de indústria

⁸ Padrão de emissão é baseado não apenas na concentração

Em algumas indústrias, existem processos produtivos específicos que também são potenciais poluidores da atmosfera. Como por exemplo, na produção do cimento Portland, há a emissão no forno onde o clínquer é produzido, e posteriormente na secagem da farinha do clínquer. Para algumas fontes, essas atividades específicas também são regulamentadas pela CONAMA 382/2006.

Os limites de emissão, na maioria dos casos, se referem à concentração (massa/volume). Para alguns casos (fabricação de celulose, alumínio, cimento, fertilizantes, ácidos, siderúrgicas e usinas de pelotização de minério de ferro) os limites de emissão relacionam a concentração limite com o produto final (fator de emissão). Como por exemplo, a indústria de fusão de vidro tem seus limites relacionados com a produção de vidros, o limite de material particulado é expresso em quilogramas de material particulado por tonelada de vidro fundido.

Apesar do aumento das restrições ambientais, as fontes antigas (estabelecidas em datas anteriores a 02/01/2007) ainda tinham as suas emissões regulamentadas pela CONAMA 08/1990. Havia, portanto, uma diferença entre os critérios aplicados às fontes recentes e as antigas. Em 2011 houve outra publicação legal que aproximou as regulamentações dos padrões de emissão de fontes antigas e novas. Essa publicação foi a Resolução do CONAMA número 436. Ela estabelece o limite para as emissões de fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação feitas anteriormente ao dia 02 de janeiro de 2007.

A versão final da Resolução n. 436/2011 do CONAMA foi gerada após 11 reuniões do Grupo Técnico (GT) de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas. As reuniões se estenderam desde setembro de 2008 até fevereiro de 2010, e utilizou metodologia semelhante à Resolução n. 382/2006 (CONAMA, 2011a). A formação do GT ocorreu após a criação do processo nº 02000.002780/2007-32, na Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental de nº 22 (CONAMA, 2007). Os trabalhos foram divididos em subgrupos, coordenados por entidades estaduais de meio ambiente cujas fontes eram mais importantes (por exemplo: papel e celulose no Paraná e siderurgia em Minas Gerais). O Quadro 7 sintetiza os dados da Resolução n. 436/2011 quanto às fontes e os poluentes regulamentados.

Quadro 7 - Atividades e Poluentes Regulamentados pela CONAMA 436/11.

Atividades	Anexo na CONAMA 436/2011	Poluentes Regulamentados	Faixas de Potência Nominal (MW)
Geração de calor por combustão de óleo combustível	Anexo I	MP, NO _x e SO _x ⁹	P <10 10 ≤ P ≤ 70 P >70
Geração de calor por combustão de gás natural	Anexo II	NO _x ⁹	P <10 10 ≤ P ≤ 70 P >70
Geração de calor por combustão de bagaço da cana-de-açúcar	Anexo III	MP e NO _x ⁹	P <50 50 ≤ P ≤ 100 P >100
Geração de calor por combustão de derivados da madeira	Anexo IV	MP e NO _x ⁹	P <10 10 ≤ P ≤ 50 P >50
Turbinas a gás para a geração de energia elétrica	Anexo V	NO _x , CO, SO _x e MP	P <100 P >100
Refinarias de petróleo¹⁰	Anexo VI	MP, NO _x , SO _x , NH ₃ , H ₂ S	N.A.
Fabricação de celulose¹⁰	Anexo VII	MP, NO _x , SO _x , ERT, NH ₃ , H ₂ S ¹¹	N.A.
Indústrias de fusão secundária de chumbo¹⁰	Anexo VIII	MP, SO _x e Pb	N.A.
Indústrias de alumínio Primário¹⁰	Anexo IX	MP e F ¹¹	N.A.
Fornos de fusão de vidro	Anexo X	MP, NO _x e SO _x ¹¹	N.A.
Indústrias de cimento Portland¹⁰	Anexo XI	MP e NO _x	N.A.
Produção de fertilizantes, ácido fosfórico, sulfúrico e nítrico¹⁰	Anexo XII	NH ₃ , F, MP, SO ₂ , SO ₃ , NO _x ¹¹	N.A.
Indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro¹⁰	Anexo XIII	MP, SO ₂ e NO _x ¹¹	N.A.

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011b).

⁹ Pode ser considerado apenas o CO para potências reduzidas.

¹⁰ Mais de uma atividade é regulamentada para esse tipo de indústria.

¹¹ Padrão de emissão é baseado não apenas na concentração.

A diferença fundamental entre as duas legislações é que elas tratam fontes de idades diferentes. A CONAMA 382/2006 diz respeito às fontes emissoras recentes (posteriores a 02/01/2007), já a CONAMA 436/2011 regula as fontes emissoras antigas (estabelecidas anteriormente a 02/01/2007). A regulamentação das emissões acontece praticamente da mesma maneira. Os limites de emissão estabelecidos baseiam-se principalmente na concentração mássica. Há alterações, principalmente no número de grupos de classificação de emissão (por potência térmica nominal - PTN). Por exemplo, a geração de calor por combustão de gás natural passou a ter 3 classes de PTN contra 2 da Resolução n.º 382/2006. A Resolução para fontes existentes (436/2011) ainda estabelece prazos para adequação das fontes aos limites estabelecidos por ela.

Embora os estados brasileiros estejam sujeitos à legislação federal, eles possuem autonomia para legislar. A área ambiental também possui normas singulares nos estados. Quanto à poluição atmosférica, a legislação estadual que mais se destaca é a do estado do Paraná. A Resolução n.º 16 da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA) de 2014 estabelece limites de emissão para fontes pontuais. Algumas dessas fontes, que já tinham sido contempladas pelas legislações federais, tiveram seus padrões de emissão reduzidos (ex.: combustão de derivados da madeira). Já outras fontes, que não eram consideradas pelas Resoluções do CONAMA, tiveram suas emissões atmosféricas regulamentadas pela SEMA (Ex.: tratamento de superfícies, aciarias elétricas, dentre outros). A Resolução SEMA n.º 16/2014 também estabelece as frequências nas quais as avaliações da emissão de poluentes (automonitoramento) devem ser feitas para cada fonte, uma das falhas da legislação federal.

O estado de Santa Catarina, apesar de ter atualizado sua legislação no ano de 2009, com o novo Código Ambiental, ainda não apresentou nenhum novo padrão de emissão.

2.4.2. Padrões de emissão da indústria da cerâmica

O setor cerâmico no Brasil (âmbito federal) não possui regulamentação específica para suas emissões atmosféricas. No entanto, usualmente são considerados os limites de emissão correntes que mais se assemelham ao processo produtivo. Os limites de emissão dependem do tipo de combustível empregado nos fornos. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2014), os combustíveis

preponderantemente empregados no Brasil, pelo setor cerâmico, são a lenha e o gás natural. A Tabela 3 apresenta o panorama do consumo energético do setor cerâmico no Brasil nos últimos anos.

Tabela 3 - Matriz energética do setor cerâmico no Brasil (em percentual de energia consumida).

	2010	2011	2012	2013
Lenha	50,7%	50,5%	51,2%	51,9%
Gás natural	25,4%	27,3%	27,4%	26,7%
Óleo combustível	6,6%	2,6%	2,3%	2,5%
Eletricidade	7,1%	7,2%	7,5%	7,5%
Outras	10,1%	12,3%	11,6%	11,4%

Fonte: Adaptado de MME (2014).

Os limites de emissão aplicáveis a maior parte do setor cerâmico seriam os referentes à queima da lenha e gás natural. Para fontes instaladas posteriormente a 02 de janeiro de 2007, é a Resolução nº 382/2006 do CONAMA que rege os limites de emissão. Para os combustíveis empregados pelo setor cerâmico, são os anexos II e IV, desta legislação, que estabelecem os padrões de emissão para a combustão do gás natural e madeira (e seus derivados) respectivamente. Tais padrões são função da potência térmica nominal (PTN) do forno. O Quadro 8 apresenta tais limites. Eles foram estabelecidos para combustão externa (caldeiras) onde os gases provenientes da queima não entram em contato com o elemento que se deseja aquecer. No caso das olarias os gases de combustão entram em contato direto com as peças cerâmicas (combustão não-externa).

Quadro 8 - Limites de emissão dos anexos II e IV da Resolução 382/2006.

PTN (MW)	Concentração limite de emissão MP (mg.Nm ⁻³)		Concentração limite de emissão NO _x (mg.Nm ⁻³)	
	Gás natural (a 3% de O ₂)	Madeira (a 8% de O ₂)	Gás natural (a 3% de O ₂)	Madeira (a 8% de O ₂)
< 10	N.A.	730	320	N.A.
10 ≤ PTN < 30	N.A.	520	320	650
30 ≤ PTN < 70	N.A.	260	320	650
≥ 70	N.A.	130	200	650

Fonte: Adaptado de CONAMA (2006).

De acordo com CONAMA (2004) os limites de emissão para a queima de madeira (da Resolução nº 382/2006) foram propostos pelo subgrupo paranaense por meio de diversos levantamentos. O escalonamento dos padrões levou em consideração a classificação previamente efetuada para as caldeiras à óleo. As concentrações limite de material particulado foram estabelecidas por meio de levantamentos bibliográficos em livros e documentos da Companhia Ambiental de Pernambuco (CPRH), da CETESB e do Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Também foi considerada a disponibilidade de equipamentos de controle de poluição capazes de proporcionar os limites propostos, além de ser feita uma comparação dos limites de emissões propostos para as maiores caldeiras com os que estavam vigentes na Europa naquele momento (CONAMA, 2004). Para o NO_x , limites de emissão não foram estabelecidos para as caldeiras menores (com pequena PTN) pois constatou-se que as emissões desse poluente é irrisória para essa faixa de potência. O limite é estabelecido para as faixas superiores de potência, pois, nas caldeiras maiores usualmente são empregados outros combustíveis conjuntamente com a madeira e/ou derivados (CONAMA, 2004).

Os limites de emissão das caldeiras a gás natural foram sugeridos pelo subgrupo do Rio de Janeiro (CONAMA, 2005b).

Para as fontes instaladas anteriormente ao dia 02 de janeiro de 2007, a emissão é regulada pela Resolução nº 436/2011, cujos limites, para cada tipo de combustível (Anexo II - gás natural e Anexo IV - madeira e derivados), estão expressos no Quadro 9.

Quadro 9 - Limites de emissão dos anexos II e IV da Resolução CONAMA nº 436/2011.

PTN (MW)	Concentração limite de emissão MP ($\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)		Concentração limite de emissão NO_x ($\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)	
	Gás natural (a 3% de O_2)	Madeira (a 8% de O_2)	Gás natural (a 3% de O_2)	Madeira (a 8% de O_2)
< 10	N.A.	730	N.A.	N.A.
$10 \leq \text{PTN} < 50$	N.A.	520	400	650
$50 \leq \text{PTN} < 70$	N.A.	300	400	650
≥ 70	N.A.	300	320	650

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011).

Para a Resolução 436/2011, novamente o subgrupo do Paraná foi o responsável por estabelecer os limites de emissão da combustão externa da madeira e derivados, e o do Rio de Janeiro o da queima de gás natural para a geração de calor (CONAMA, 2008). O subgrupo paranaense apresentou sua proposta considerando um estudo que avaliou 378 laudos de emissão. Para o estabelecimento dos limites de emissão a partir da queima da madeira partiu-se de algumas premissas: de que fosse estabelecido um limite que reduzisse significativamente o nível de emissão das fontes então existentes; de que não fossem utilizados limites mais restritivos que os estabelecidos pela Resolução nº 382/2006; e de que não fosse exigido melhorias consideradas inviáveis (reduções acima de 70% nas concentrações de emissão) (CONAMA, 2010).

Além dos padrões de emissão nacionais, alguns estados estabelecem limites locais, como é o caso do estado do Paraná, com a Resolução nº 16/2014. Da mesma forma que as resoluções nacionais, os limites são estabelecidos de acordo com o combustível utilizado pelo empreendimento. Essa resolução diferencia a combustão não-externa, da externa: a combustão externa ocorre quando não há contato entre os gases de combustão e o material ou produto processado. Já na combustão não-externa (caso dos fornos das olarias), tal contato existe. O Quadro 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os limites para as emissões da combustão interna (independente da data de instalação) para os combustíveis mais utilizados pelo setor cerâmico.

Quadro 10 - Limites de emissão da Resolução SEMA/PR nº 16/2014.

PTN (MW)	Concentração limite de emissão MP a 17% de O ₂ (mg.Nm ⁻³)		Concentração limite de emissão NO ₂ a 17% de O ₂ (mg.Nm ⁻³)	
	Gás natural ¹²	Madeira	Gás natural	Madeira
< 10	150	560	320	N.A.
10 ≤ PTN < 50	125	400	320	500
50 ≤ PTN < 70	50	200	320	500
70 ≤ PTN < 100	50	200	200	500
≥ 100	50	100	200	500

Fonte: Adaptado de Paraná (2014).

¹² Esse limite para o MP é aplicável apenas para gás de refinaria, gás de xisto e gás proveniente da gaseificação de resíduos.

A resolução paranaense (PARANÁ, 2014) ainda estabelece limites para o monóxido de carbono e para os óxidos de enxofre.

Legislação Internacional:

A nível internacional, nos Estados Unidos os limites de emissão para fontes novas são estabelecidos pela parte 60, subcapítulo c, Capítulo I, Título 40, do Código de Regulamentações Federais (CFR). Não existem limites de emissão específicos para a indústria cerâmica. Porém, existe uma sugestão de regulamentação, em vias de ser aprovada, cuja proposta foi efetuada no dia 18 de dezembro de 2014 pela USEPA. Devem ser respeitados dois critérios de emissão. Os limites propostos estão dispostos no Quadro 11.

Quadro 11 - Limites de emissão propostos nos Estados Unidos para a indústria cerâmica (a 7% de oxigênio).

	HF, HCl e Cl ₂	Critério 1 Material Particulado	Critério 2 Material Particulado	Critério 1 Mercúrio	Critério 2 Mercúrio
Forno Grande ¹³	26 kg.h ⁻¹	0,082 kg/t de produto	92 mg.Nm ⁻³	1,1x10 ⁵ kg/t de produto	29 µg.Nm ⁻³
Forno Pequeno ¹⁴				9,9x10 ⁵ kg/t de produto	70 µg.Nm ⁻³

Fonte: Adaptado de Estados Unidos (2014).

A proposta estadunidense levou em consideração a tecnologia de controle de máximo alcance (*Maximum Achievable Control Technology* - MACT). Para fontes existentes, o MACT não pode ser menos restritivo que a emissão atingida pelas fábricas que possuem os 12% menores níveis de emissão ou que o nível de emissão das 5 melhores fábricas (dependendo do tamanho da base de dados). Já o MACT para fontes novas não pode ser menos restritivo que o nível de emissão da fonte com o melhor desempenho no controle de emissão (fonte similar em porte). Esses níveis de emissão, seja para fontes existentes ou novas, são chamados de "piso" do MACT (ESTADOS UNIDOS, 2014). Caso a USEPA estabeleça limites mais rigorosos que o "piso", deverá considerar aspectos econômicos, energéticos, dentre outros. O estabelecimento desses valores seguem uma avaliação

¹³ Capacidade de produção maior igual a 10 toneladas por hora

¹⁴ Capacidade produtiva inferior a 10 toneladas por hora

estatística considerando equações do Limite de Previsão Superior (*Upper Prediction Limit* - UPL). As equações a serem empregadas dependerão da distribuição dos dados (log-normal, normal, assimétrica, etc.) (ESTADOS UNIDOS, 2014).

Na União Europeia (UE), a política de controle da poluição ambiental foi definida pela Diretiva de Controle e Prevenção Integrados da Poluição, nº 2008/1/CE, de janeiro de 2008. Nessa Diretiva, não há a indicação de valores específicos. Porém, determina o uso das "melhores técnicas disponíveis" (*Best Available Techniques* - BAT) para a prevenção da poluição, como limites de emissão. Já a Diretiva 2010/75/UE, de 24 de novembro de 2010 estabeleceu que a própria União Europeia deve elaborar, revisar e atualizar documentos de referência sobre as melhores técnicas disponíveis.

As melhores tecnologias disponíveis são consideradas o estágio mais efetivo e avançado no desenvolvimento de atividades e de seus métodos de operação. Estes últimos indicam a aplicabilidade prática de técnicas específicas para prover, em princípio, os limites de emissão projetados para prevenir, e onde não é aplicável, geralmente, reduzir emissões e o impacto no ambiente como um todo. "Melhor" significa a mais efetiva em atingir um alto nível de proteção ao ambiente. "Técnica", são chamadas tanto a tecnologia aplicada quanto a forma que a instalação é projetada, construída, mantida, operada e descomissionada. "Disponíveis" são as técnicas que são desenvolvidas em uma escala que permite a implementação em setores industriais relevantes, sob condições técnica e economicamente viáveis, considerando custos e vantagens (UE, 2007).

Essas técnicas, para as diferentes matrizes ambientais (água, solo e ar) foram elencadas em uma série de documentos. Essas informações estão disponíveis, para cada setor potencialmente poluidor, no *site*¹⁵ do *Bureau* Europeu de Controle e Prevenção Integrados da Poluição (EIPPCB). O documento referência para o setor cerâmico foi publicado em agosto de 2007, e apresenta os limites das melhores técnicas disponíveis a serem considerados à indústrias cerâmicas com uma capacidade produtiva maior que 75 toneladas por dia e/ou possuir forno maior que 4 m³, com produção por capacidade de forno maior que 300 kg.m⁻³ (UE, 2007). Os valores elencados nesse documento, como as concentrações das melhores técnicas disponíveis, não devem ser considerados como limites de emissão, mas sim como valores de referência para o licenciamento ambiental, que por sua vez deve

¹⁵ <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

considerar fatores como localização geográfica, condições ambientais, características técnicas da fábrica, dentre outros. O Quadro 12 apresenta os valores referência, de acordo com o equipamento de controle utilizado.

Quadro 12 - Concentrações referência da emissão da indústria cerâmica na União Europeia.

	Material particulado (mg.m⁻³)	Dióxido de nitrogênio (mg.m⁻³)	Dióxido de enxofre (mg.m⁻³)	Fluoretos (como HF, mg.m⁻³)	Cloretos (como HCl, mg.m⁻³)
Filtro Manga	20	250-500	500-2000-	1-10	1-30
Absorvedor Cascata	50				

Fonte: Adaptado de UE (2007).

Na Índia, país de importante produção de cerâmica, estabeleceu limites para a emissão de poluentes em 1996, cujo limite de emissão depende do porte da empresa. Também é estabelecido um mínimo para a altura da chaminé. Tais valores estão dispostos no Quadro 13.

Quadro 13 - Padrão de emissão para a produção de tijolos na Índia.

Produção (P)	Material Particulado (mg.m⁻³)	Altura mínima Chaminé	
P<15.000 tijolos/dia	1000	22 m	Ou 12 m com exaustor de 50 mm de coluna de H ₂ O
15.000≤P<30.000 tijolos/dia	750	27 m	Ou 15 m com exaustor de 50 mm de coluna de H ₂ O
P≥30.000 tijolos/dia	750	30 m	Ou 17 m com exaustor de 50 mm de coluna de H ₂ O

Fonte: Adaptado de Índia (2007).

2.4.3. Padrões de qualidade do ar no Brasil

Conforme Vieira (2009) o primeiro documento legal que estabeleceu padrões de qualidade do ar no Brasil foi a Portaria nº 231 de 1976. Ela foi publicada pelo Ministério de Estado do Interior e estabeleceu objetivos para as concentrações de determinados poluentes no ar. O Quadro 14 apresenta os poluentes regulamentados por essa Portaria e seus valores de concentração.

Quadro 14 - Objetivos estabelecidos pela Portaria nº 231/1976.

Poluente	Cálculo	Padrão Primário
Partículas em suspensão	Média geométrica anual	80 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 24 horas	240 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Dióxido de enxofre (SO₂)	Média aritmética anual	80 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 24 horas	365 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Monóxido de carbono (CO)	Média de 8 horas	10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 1 hora	40.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Oxidantes Fotoquímicos	Média de 1 hora	160 $\mu\text{g.m}^{-3}$

Fonte: Adaptado de Brasil (1999).

Uma das consequências do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), de 1989, foi a publicação da Resolução nº 03 de 1990 do CONAMA, responsável por estabelecer os padrões de qualidade do ar no Brasil. Os padrões são divididos entre padrões primário e padrões secundários de qualidade do ar. Os padrões primários são as concentrações que, se forem ultrapassadas, podem afetar a saúde da população. Já os secundários são concentrações, 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 (CONAMA, 1990). Os padrões primários podem ser entendidos como metas a curto e médio prazo, no entanto, os padrões secundários podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se metas de longo prazo (VIEIRA, 2009).

Os poluentes regulamentados pela Resolução n. 03 de 1990 do CONAMA são: particulado total em suspensão (PTS), particulado inalável (MP₁₀), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO) e fumaça. O Quadro 15 apresenta os limites estabelecidos para a concentração desses poluentes.

Quadro 15 - Padrões de qualidade do ar constantes na Resolução nº03/1990.

Poluente	Cálculo	Padrão primário	Padrão secundário
Partículas totais em suspensão (PTS)	Média geométrica anual	80 $\mu\text{g.m}^{-3}$	60 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 24 horas ¹⁶	240 $\mu\text{g.m}^{-3}$	150 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Partículas inaláveis (MP₁₀)	Média aritmética anual	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	
	Média de 24 horas ¹⁶	150 $\mu\text{g.m}^{-3}$	
Dióxido de enxofre (SO₂)	Média aritmética anual	80 $\mu\text{g.m}^{-3}$	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 24 horas ¹⁶	365 $\mu\text{g.m}^{-3}$	100 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Dióxido de nitrogênio (NO₂)	Média aritmética anual	100 $\mu\text{g.m}^{-3}$	100 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 1 hora	320 $\mu\text{g.m}^{-3}$	190 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Ozônio (O₃)	Média de 1 hora ¹⁶	160 $\mu\text{g.m}^{-3}$	
Monóxido de Carbono (CO)	Média de 8 horas ¹⁶	10.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$	
	Média de 1 hora ¹⁶	40.000 $\mu\text{g.m}^{-3}$	
Fumaça	Média aritmética anual	60 $\mu\text{g.m}^{-3}$	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$
	Média de 24 horas ¹⁶	150 $\mu\text{g.m}^{-3}$	100 $\mu\text{g.m}^{-3}$

Fonte: Adaptado de CONAMA (1990).

A Resolução de 1990 ainda estabelece valores de concentração nos quais são decretados níveis de atenção, alerta e emergência para a execução de planos de emergência. Tais planos são executados no caso da ocorrência de eventos críticos de poluição do ar.

A Resolução nº 5 do CONAMA (1989) que instituiu o PRONAR, também estabeleceu uma classificação de áreas, as quais, teriam diferentes padrões de qualidade do ar a serem respeitados:

- Classe I: Áreas de preservação, lazer e turismo, tais como parques nacionais e estaduais, Reservas e estações ecológicas, estâncias hidrominerais e hidrotermais. Nestas áreas deverá ser mantida a qualidade do ar em nível o mais próximo possível do verificado sem a intervenção antropogênica;
- Classe II: Áreas onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo padrão secundário de qualidade;
- Classe III: Áreas de desenvolvimento onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo padrão primário de qualidade.

¹⁶ Não deve ser superada mais de uma vez por ano.

A responsabilidade da classificação de áreas, conforme a CONAMA 03/1990 é de cada estado, sendo que até a categorização definitiva das áreas, os padrões primários de qualidade do ar deveriam ser adotados.

Como é possível notar, alguns padrões de qualidade do ar mantiveram-se inalterados desde 1976, apesar dos avanços em pesquisas epidemiológicas sobre a poluição atmosférica. Diante desse fato, o estado de São Paulo, no ano de 2013, estabeleceu os seus próprios padrões de qualidade do ar, por meio do Decreto Estadual nº 59.113. Tais padrões estão em consonância com as diretrizes mais recentes da Organização Mundial da Saúde, do ano de 2005. Os padrões foram escalonados em três metas intermediárias (MI) e um padrão final, correspondente aos valores estabelecidos pelas diretrizes da OMS. O Quadro 16 apresenta os padrões de qualidade do ar que estão vigentes atualmente em São Paulo e os compara aos padrões atualmente vigentes no Brasil e os valores estabelecidos pelas diretrizes da OMS.

Quadro 16 - Comparação entre os padrões nacionais, paulistas e da OMS

Poluente	Tempo de média ¹⁷	Padrão SP MI-1 ¹⁸ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Padrão Primário CONAMA 03/1990 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Padrões da OMS ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Partículas totais em suspensão (PTS)	M.G.A.	80	80	Inexiste
	24 h	240	240	
Partículas inaláveis (MP₁₀)	M.A.A.	40	50	20
	24 h	120	150	50
Partículas inaláveis finas (MP_{2,5})	M.A.A.	20	Inexiste	10
	24 h	60	Inexiste	25
Dióxido de enxofre (SO₂)	M.A.A.	40	80	20
	24 h	60	365	Inexiste
Dióxido de nitrogênio (NO₂)	M.A.A.	60	100	40
	1 h	260	320	200
Ozônio (O₃)	8 h	140	160 ¹⁹	100
Chumbo(Pb)	M.A.A.	0,5	Inexiste	Inexiste

Fonte: Adaptado de CONAMA (1990), São Paulo (2013) e OMS (2005).

¹⁷M.G.A.: média geométrica anual; M.A.A.: Média aritmética anual.

¹⁸Meta intermediária I.

¹⁹Padrão para média de 1 hora.

Encontra-se em processo de discussão a atualização da Resolução nº 03/1990, por meio do Grupo de Trabalho de qualidade do ar, que até o momento já realizou 7 reuniões (a última em outubro de 2014). A atualização visa adequar os padrões nacionais, as diretrizes da OMS, por meio de padrões que serão escalonados temporalmente, tornando-se cada vez mais rígidos (assim como a regulamentação proposta no estado de SP). Serão considerados novos poluentes (chumbo e material particulado inalável fino - MP_{2,5}). A nova Resolução ainda propõe a atribuição aos estados para o estabelecimento de critérios metodológicos aplicados ao licenciamento ambiental. Há também a criação dos planos estratégicos de qualidade do ar, os quais devem contemplar minimamente os inventários de emissões e o monitoramento de qualidade do ar (CONAMA, 2014).

2.4.4. O gerenciamento da qualidade do ar nos Estados Unidos

A legislação de poluição do ar nos Estados Unidos é regada pelo *Clean Air Act* (CAA), que teve sua primeira versão publicada em 1963 e a sua última em 1990. O estabelecimento de limites de emissão está intimamente relacionado ao cumprimento dos padrões de qualidade do ar.

Quanto as emissões de fontes fixas novas (ou modificação de fontes existentes), existem procedimentos diferentes que regulam os padrões de emissão, e tal diferença está na localização da futura fonte (*National Academy of Sciences* - NAS, 2004). Se ela estiver localizada em uma área em que o padrão de qualidade estadunidense (*National Ambient Air Quality Standards* - NAAQS) do ar já esteja comprometido, o licenciamento é chamado de revisão de fonte nova (*New Source Review* - NSR). Caso seja instalada em um local em que os padrões não são violados é chamado de prevenção de deterioração significativa (*Prevention of Significant Deterioration* - PSD).

A NSR permite a instalação de novas fontes apenas se as taxas de emissão não forem incrementadas nesse local (geralmente um condado, subdivisão administrativa estadunidense). Esse caso normalmente envolve o fechamento de um empreendimento emissor antigo, pois o objetivo do NSR é justamente reduzir as emissões. O caso do PSD classifica as áreas dos Estados Unidos em três grupos distintos (semelhante à classificação realizada pela Resolução nº 8/1990 do CONAMA), sendo que a Classe I seria equivalente aos parques

nacionais, áreas selvagens e outras áreas ambientalmente sensíveis. A Classe II abrange a maioria das áreas e a Classe III é raramente considerada, onde os critérios para a proteção da qualidade do ar são mais brandos. Cada classe permite um determinado incremento nas concentrações ambientais de poluentes atmosféricos causado por uma fonte emissora (NAS, 2004). O Quadro 17 exemplifica a aplicação da PSD.

Quadro 17 - Incremento permitido na concentração ambiental de poluentes conforme a PSD dos Estados Unidos.

Poluente	Medição	Incremento permitido ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		
		Classe I	Classe II	Classe III
MP ₁₀	Média aritmética anual	4	17	34
	Máxima média de 24 horas	8	30	60
SO ₂	Média aritmética anual	2	20	40
	Máxima média de 24 horas	5	91	182
	Máxima média de 3 horas	25	512	700
NO ₂	Média aritmética anual	2,5	25	50

Fonte: Adaptado de NAS (2004).

O referido incremento, quando somado às concentrações ambientais existentes (*background*) não pode ultrapassar os padrões de qualidade do ar (NAAQS). Conforme a USEPA (2014), nesse contexto de prever as concentrações ambientais causadas por uma nova fonte emissora, e até de caracterizar as condições existentes de poluição do ar (conjuntamente com dados de monitoramento) é utilizada a modelagem de dispersão atmosférica.

Outra ferramenta importante para o gerenciamento de qualidade do ar nos Estados Unidos são os planos estaduais de implementação (*State Implementation Plans* - SIP). Eles são a combinação de esforços locais, estaduais e federais para que os padrões de qualidade do ar não sejam violados. Quando da aprovação de novos padrões de qualidade do ar, ou atualizações, cada estado americano tem a obrigatoriedade de, em até três anos da publicação desses novos padrões, apresentar o SIP. Obrigatoriamente os SIP devem conter (NAS, 2004):

- Limites de emissão e controles exequíveis, assim como calendários e cronogramas de atendimento das metas;
- Dados de monitoramento de qualidade do ar;
- Programa para fazer cumprir os limites de emissão e as medidas de controle;

- Disposições adequadas para proibir emissões dentro do estado que contribuam significativamente para o não atendimento dos padrões de qualidade do ar em qualquer outro estado;
- Itens que assegurem que o estado terá pessoal, orçamento e autoridade suficiente para fazer cumprir o plano;
- Exigência que fontes de emissão estacionárias forneçam relatórios de emissão periodicamente;
- Atendimento aos requisitos quanto ao PSD, consulta pública e notificação pública;
- Dados de modelagem de dispersão para demonstrar o quanto as emissões afetam a qualidade do ar;
- A cobrança, dos empreendimentos de maior emissão, de taxas que cubram financeiramente os custos de revisão e ação sobre os pedidos de licenciamentos, além da implementação dos termos e condições dos licenciamentos;
- Permissão a participação de subdivisões políticas locais que são afetadas pelo plano.

Além dos pontos acima colocados, caso alguma área do estado não atenda os padrões de qualidade do ar, devem ser fornecidos os seguintes itens (em um prazo de três anos) (NAS, 2004):

- Fornecer um plano para a implementação de tecnologias de controle de emissão;
- Incluir um inventário de emissões abrangente para todos os poluentes relevantes;
- Garantir redução de emissões suficientes para que haja progresso no atendimento dos NAAQS;
- Prover a aplicação de medidas de contingência caso áreas falhem em progredir no atendimento dos padrões no prazo estabelecido.

Caso a USEPA desaprove o SIP, ou note que o estado esteja sendo negligente em sua implementação, podem ocorrer sanções federais ao estado, como o corte de verbas para a construção/manutenção de rodovias. Em casos extremos, a USEPA pode preparar um plano federal, que se sobreponha ao SIP (NAS, 2004).

2.5. MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A União Europeia define a modelagem matemática de dispersão atmosférica como uma das metodologias para a avaliação de impacto ambiental, juntamente com o monitoramento da qualidade do ar. O emprego da medição, juntamente com a modelagem, apresenta clara vantagem sobre o emprego do monitoramento apenas (UE, 2010).

A modelagem de dispersão utiliza equações matemáticas que descrevem a atmosfera, a dispersão dos poluentes e os processos físico-químicos que acontecem na pluma. Isso é feito com o objetivo de se calcular as concentrações em diferentes locais (HOLMES e MORAWSKA, 2006). Nesse contexto, o termo “dispersão” refere-se à combinação entre a difusão (devido ao movimento turbulento) e a advecção (devido ao vento) que ocorre na superfície da Terra (STOCKIE, 2011).

Os modelos matemáticos de dispersão possuem um importante papel no gerenciamento da qualidade do ar. Eles são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de planos de ação para a melhoria da qualidade do ar. Por meio deles, a contribuição de diversas fontes para a contaminação do ar pode ser identificada (UE, 2000).

Os modelos de dispersão também podem ser aplicados para o planejamento urbano, prevendo o impacto do desenvolvimento urbano e suas atividades. Eles servem também no auxílio da alocação ótima de estações de monitoramento da qualidade do ar nas cidades (MESINK, LEFEBRE e DE RIDDER, 2004).

Uma das vantagens do uso de modelos é a melhora do mapeamento da distribuição espacial dos contaminantes. O emprego da modelagem pode comprovar a necessidade ou não do uso do monitoramento, o que ocasiona em uma avaliação de qualidade do ar menos custosa e que ainda assim cumpre com seus objetivos (UE, 2000).

Outro benefício da modelagem perante o monitoramento é a capacidade da previsão e análise de eventos de poluição atmosférica. Já as suas desvantagens residem no fato dos inventários de emissão raramente refletirem o que ocorre na realidade, impossibilitando a previsão de acidentes, episódios singulares (manutenção, limpeza de instalações) e a questão das emissões fugitivas, que dificilmente são consideradas nos inventários. Tal erro é minimizado quando são avaliados impactos em longo prazo (UE, 2010).

Os métodos de cálculo de concentrações ambientais de poluentes podem ser, de um lado, simples como uma equação empírica, até o emprego da fluidodinâmica computacional que tenta simular uma ampla gama de detalhes associados com a turbulência e a termodinâmica, no outro extremo. Os modelos comumente empregados estão no meio desses dois extremos (EGAN e MURPHY, 2007).

2.5.1. Tipos de modelos

Existem diversas formas de se classificar os modelos de dispersão atmosférica. De acordo com Lora (2000) os modelos podem ser segregados de acordo com a sua estrutura básica, com o sistema de referência, com a quantidade de dimensões do domínio computacional e com o método de resolução de equações do modelo. Essa classificação está apresentada no Quadro 18.

Quadro 18 - Classificação dos modelos de dispersão atmosférica

Critério de classificação	Tipo
Estrutura básica do modelo	Determinístico ou estatístico; Estacionário ou dependente do tempo;
Sistema de referência	Euleriano ou lagrangiano;
Dimensão do domínio computacional	Unidimensional ou multidimensional;
Método de resolução das equações	Analítico ou numérico;

Fonte: Adaptado de Lora (2000).

Um modelo determinístico é um modelo matemático no qual os dados de saída são precisamente determinados através de relações conhecidas entre estados e eventos. Nesse tipo de modelo, um dado de entrada sempre produzirá um mesmo dado de saída. Os modelos usados para o cálculo da concentração de poluentes no ar baseiam-se na equação da difusão (LORA, 2000). Esse tipo de modelo é utilizado quando os processos (físicos, químicos, etc.) são suficientemente compreendidos. São modelos difíceis de desenvolver, pois cada processo deve ser representado por um algoritmo. Além disso, as relações entre os diferentes processos também devem ser representadas (VALLERO, 2008).

Um modelo estatístico (ou probabilístico/estocástico) considera que os eventos que afetam o comportamento de poluentes são aleatórios, portanto tais modelos são baseados em probabilidades (VALLERO, 2008).

Quanto ao sistema de referência, duas abordagens usualmente são utilizadas. Os modelos eulerianos assumem um sistema de coordenadas fixo no espaço, quanto ao comportamento dos poluentes simulados. Já nos modelos lagrangianos as variações de concentração são descritas com relação ao fluxo (LORA, 2000).

Há ainda a categorização de acordo com a aplicação e seus objetivos, conforme o Quadro 19.

Quadro 19 - Classificação de acordo com os fins de aplicação do modelo.

Aplicação	Objetivos
Pesquisa científica	Adquirir conhecimentos sobre processos básicos da atmosfera, provar novas teorias, ensino.
Gestão da qualidade do ar e tomada de decisões	Incorporar restrições com relação à qualidade do ar no planejamento do uso do solo e do transporte.
Impacto ambiental	Estudo do impacto da contaminação do ar por novas fontes.
Episódios de poluição do ar	Criar um sistema de alerta para episódios críticos de poluição do ar; localizar áreas potencialmente afetadas caso acidentes provoquem contaminação do ar.

Fonte: Adaptado de Lora (2000).

Conforme Egan e Murphy (2007) os modelos podem ser classificados como de investigação (*screening*) ou como refinados. Os de investigação são relativamente simples de se utilizar, são mais conservadores em seus resultados (superestimam as concentrações obtidas). O conservadorismo desses modelos pode estar vinculado ao fato de que eles se baseiam em combinações pré-estabelecidas de condições meteorológicas; ou fazem algumas considerações conservadoras sobre a trajetória da pluma ou sobre o contato da pluma com o solo (EGAN e MURPHY, 2007).

Os modelos refinados sempre demandam o uso de dados meteorológicos representativos e geralmente requerem informações detalhadas sobre a elevação do terreno, dentre outros. Esses modelos normalmente prevêem concentrações mais realistas e menos conservadoras. Há, portanto, um contraponto na modelagem entre conservadorismo e conveniência *versus* exatidão e complexidade (EGAN e MURPHY, 2007).

2.5.2. Modelo AERMOD

AERMOD é um acrônimo para Modelo da Sociedade Americana de Meteorologia e do Comitê da Agência Americana de Proteção Ambiental para o Melhoramento de Modelos Regulatórios (*American Meteorological Society and USEPA Regulatory Model Improvement Committee Model*). Esse modelo foi desenvolvido durante 12 anos e passou por uma avaliação estatística de desempenho extensiva (EGAN e MURPHY, 2007). Conforme classificação do Quadro 18, ele é um modelo determinístico, estacionário, euleriano, multidimensional e analítico.

Por meio do Código Federal n. 40 dos Estados Unidos (EUA, 2005), parte 51, anexo W, o AERMOD passou a ser um modelo recomendado para a simulação da dispersão de poluentes, substituindo o modelo ISC3. Ele é amplamente utilizado para avaliações de impacto ambiental causado por emissões atmosféricas, não apenas nos Estados Unidos, mas em países como Austrália, Canadá e Nova Zelândia.

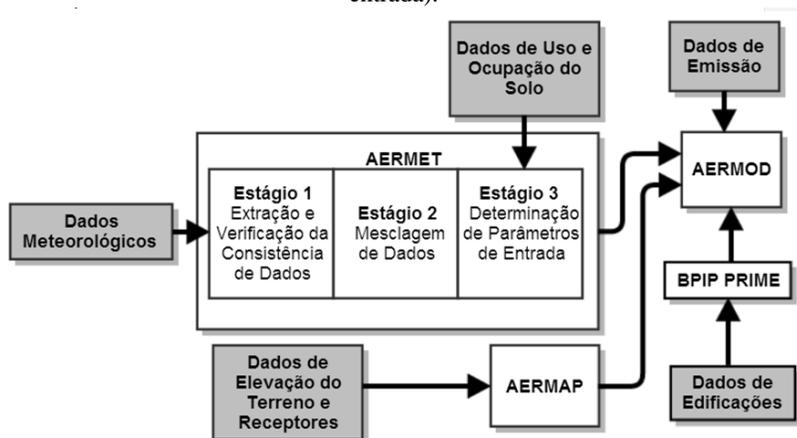
O AERMOD é um modelo de estado estacionário e gaussiano. Ele incorpora a dispersão do ar baseada nos conceitos de estrutura da turbulência da camada limite planetária, incluindo o tratamento, tanto de fontes superficiais, quanto elevadas, como também de terrenos complexos e simples (VALLERO, 2008; CAPUTO, GIMÉNEZ e SCHLAMP, 2003). A camada limite planetária (PBL - *Planetary Boundary Layer*) consiste na camada de ar turbulento próxima a superfície da Terra, que possui seu comportamento regido pelo aquecimento e fricção da superfície. Ela normalmente atinge algumas centenas de metros durante a noite, chegando de 1 a 2 km de altura durante o dia (USEPA, 2004b)

O modelo é capaz de simular a emissão de múltiplas fontes, incluindo fontes pontuais, superficiais e volumétricas. A distribuição da camada limite estável é assumida como sendo gaussiana em ambas as direções (vertical e horizontal). Entretanto, na camada limite convectiva (CBL - *Convective Boundary Layer*), a distribuição vertical é descrita com o uso de uma função de distribuição de probabilidade bi-gaussiana, enquanto a horizontal é considerada como uma gaussiana simples. A camada limite convectiva (CBL) é como é descrita a camada limite planetária (PBL) quando há instabilidade térmica, ocasionando uma maior turbulência (HOLMES e MORAWSKA, 2006).

O AERMOD considera os efeitos de rebaixamento da pluma (*downwash*) devido à proximidade de prédios, baseado nos algoritmos

do modelo PRIME. Ele emprega dados meteorológicos horários em suas simulações para estimar as concentrações médias em escalas de tempo que vão desde uma hora até um ano. Dois pré-processadores são utilizados, o AERMET e o AERMAP. O AERMET é o responsável por processar os dados de entrada meteorológicos. Já o AERMAP processa dados de elevação do terreno e gera a grade de receptores para uso no AERMOD (EUA, 2005). A Figura 4 apresenta o esquema de funcionamento do AERMOD.

Figura 4 - Esquema de Funcionamento do AERMOD (em cinza os dados de entrada).



Fonte: Autoria Própria

Quanto a sua precisão, o AERMOD foi testado em diversas condições. Segundo Brode (2012), a performance do modelo foi avaliada para 17 base de dados. Essas avaliações foram tanto independentes, quanto relacionadas à formulação do modelo. Nesses estudos também foi comparado o desempenho do AERMOD com outros modelos (ISCT3, ISCPRIIME e CTDMPPLUS), e de forma consistente o AERMOD foi o modelo com o melhor desempenho (BRODE, 2012). Nessas avaliações, chegou-se a conclusões do que já se sabe dos modelos de dispersão: eles são mais precisos para estimar concentrações para longos períodos de média e que eles são razoavelmente confiáveis para estimar a magnitude de concentrações elevadas ocorrendo em algum tempo, em algum lugar (EUA, 2005). Entretanto, as estimativas em locais e tempos específicos se correlacionam pobremente com dados medidos. Os erros das estimativas atingem de $\pm 10\%$ a $\pm 40\%$. Esses

erros ocorrem devido a incertezas consideradas redutíveis pela USEPA (EUA, 2005) na estimativa do centro da pluma e outras incertezas inerentes.

2.5.3. Avaliação de impacto ambiental no ar através da modelagem de dispersão atmosférica

Historicamente, a avaliação da qualidade do ar baseia-se em dados de monitoramento ambiental, pois os impactos à saúde e aos ecossistemas tem sido estudados em relação às concentrações ambientais medidas. Apesar dos dados provenientes da modelagem não terem o grau de confiança dos resultantes do monitoramento, existem três motivos principais para a aplicação conjunta do monitoramento com a modelagem (Agência Europeia de Meio Ambiente - EEA, 2011):

- A cobertura espacial do monitoramento ambiental é, normalmente, limitada. A modelagem provê uma abrangência espacial mais completa sobre a qualidade do ar;
- A modelagem pode ser aplicada para o prognóstico, ou seja, para prever a qualidade do ar no caso de mudanças nas condições de emissão ou nas condições meteorológicas;
- Um entendimento maior sobre fontes, causas e processos que determinam a qualidade do ar pode ser obtido por meio da modelagem.

Outras vantagens consistem na avaliação de impacto em áreas em que o monitoramento ambiental não é realizado, a redução de pontos de monitoramento (através da distribuição espacial das concentrações, sabe-se os locais onde o monitoramento deve ser prioritário), economizando gastos, além de propiciar o desenvolvimento e o detalhamento de medidas tomadas para reduzir concentrações ambientais de poluentes (EEA, 2011). Porém, a modelagem possui suas desvantagens:

- Requer grande número de dados de entrada, que nem sempre são confiáveis, ou são de difícil aquisição (particularmente os dados de emissão e dados meteorológicos);
- Existem incertezas na previsão dos modelos, que demandam um processo extensivo de validação, empregando dados de monitoramento;

- A habilidade dos modelos de representar a realidade é limitada, por exemplo, na resolução espacial e na descrição dos processos de dispersão;
- A qualidade dos resultados da modelagem depende da capacitação dos usuários dos modelos, bem como da interação com os responsáveis pelo desenvolvimento dos modelos.

A província canadense da Colúmbia Britânica (2008), em suas diretrizes para a modelagem de dispersão, estabeleceu que a avaliação da qualidade do ar através da modelagem depende do nível de detalhe e do escopo exigido pela avaliação, que por sua vez são determinados pelo(a)s:

- Objetivos da modelagem: Os objetivos são baseados nas necessidades de informação do tomador de decisão. Estas demandas determinarão a escolha do modelo adequado. Caso deseje-se estimar o pior caso de concentração ambiental causada por uma determinada emissão, um modelo de investigação (*screening*) é suficiente;
- Considerações técnicas: Envolvem as configurações meteorológicas e de emissões. Por exemplo, se a modelagem é efetuada em um terreno complexo, uma avaliação mais detalhada precisa ser efetuada e, portanto, um modelo mais elaborado necessita ser empregado;
- Níveis de risco associados: dependem, além do tipo de contaminante, da sua taxa de emissão, da concentração de fundo no ambiente, da sensibilidade do domínio de modelagem, das consequências das decisões baseadas na modelagem, dentre outros.

Considerando esses três fatores acima, a avaliação de impacto ambiental por meio da modelagem pode ser classificada em três grupos (COLÚMBIA BRITÂNICA, 2008). O primeiro grupo abrange os casos em que apenas a simulação da condição crítica é suficiente, sendo que os modelos de investigação são os mais recomendados para esse caso.

O segundo grupo compreende as situações nas quais é necessário se conhecer a distribuição espacial e temporal das concentrações. Essa distribuição fornece um padrão espacial das máximas concentrações em diferentes tempos de médias e/ou identifica as áreas em que os limites de concentração ambiental de poluentes serão

excedidos. Além disso, mostra a frequência em que essas extrapolações acontecem. Esse grupo compreende os modelos gaussianos estacionários que utilizam dados meteorológicos horários, como o AERMOD.

Já o terceiro tipo de avaliação de impacto ambiental ocorre quando o primeiro e o segundo nível apontam violações dos padrões ambientais de qualidade do ar; é necessário contemplar múltiplas fontes; transformações químicas e efeitos associados a topografias complexas; e a fonte emite poluentes de alto risco ambiental. Para esse terceiro caso é recomendado o uso de modelos de *puffs* gaussianos e modelos fotoquímicos de grade.

Devido a elevada sensibilidade dos modelos à qualidade dos dados de entrada, autarquias estabeleceram diretrizes para a execução de estudos de modelagem de dispersão atmosférica (desde a seleção dos dados de entrada até a apresentação dos resultados). Quanto aos dados meteorológicos, a regulamentação que estabeleceu o AERMOD como modelo recomendado (EUA, 2005) também considera critérios mínimos: o uso de cinco anos de dados meteorológicos representativos, dando preferência a sequência de dados mais recente. Caso os dados sejam medidos no próprio local da modelagem, aceita-se 1 ano.

A Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB, 2014) estabelece algumas instruções para a modelagem de dispersão atmosférica, que estão listadas no Quadro 20.

Quadro 20 - Conteúdo e parâmetros mínimos para um estudo de modelagem de dispersão atmosférico conforme a CETESB.

Item	Critério
Períodos de simulação	Curta e longa duração.
Espaçamento da grade	250 metros no entorno da fonte e pontos de máxima concentração e 500 metros no restante do domínio.
Meteorologia	Utilizar dados horários para um período de 5 anos, se as medições foram realizadas na área de abrangência da emissão ou em região próxima. Empregar um ano de dados meteorológicos para medições no próprio empreendimento avaliado.
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Considerar conversão plena dos NO _x para NO ₂ .
Material Particulado (MP)	Considerar todo o MP como MP ₁₀ .

Fonte: Adaptado de CETESB (2014).

A Colúmbia Britânica (2008), por meio de suas diretrizes para a modelagem de dispersão na qualidade do ar, estabelece espaçamentos para as grades de receptores: 20 metros nas proximidades da fonte; 50 metros num raio de até 500 metros da fonte; 250 metros até 2 km de distância; 500 metros até 5 km da fonte; e 1 km para locais afastados mais de 5 km da fonte.

A apresentação de resultados da modelagem também é regrada em algumas localidades. Na Nova Zelândia (2004), os resultados de um estudo de dispersão podem abranger os seguintes aspectos: estatísticas (apresentação de valores máximos para cada receptor, percentis, e tabelas de maiores valores simulados), tabulados (registro de todos os dados simulados por receptor) e gráficos (linhas, barras, contornos da pluma, dentre outros).

A CETESB exige, nos estudos de dispersão, a presença de dados como: coordenadas dos pontos de máximas concentrações, apresentação de máximas concentrações (para períodos de curta e longa exposição) e isolinhas de concentração.

2.6. PRODUÇÃO DE CERÂMICA

A fabricação de produtos cerâmicos no Brasil é classificada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), por meio do Cadastro Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) em 3 classes:

- Fabricação de produtos cerâmicos refratários (classe 2341-9);
- Fabricação de produtos não refratários para uso estrutural na construção (classe 2342-7);
- Fabricação de produtos não refratários não especificados anteriormente (classe 2349-4).

As fábricas de cerâmica vermelha, abordadas nesse estudo, são compreendidas pela classe 2342-7, pela subclasse 2342-7/02: fabricação de artefatos de cerâmica e barro cozido para uso na construção, exceto azulejos e pisos.

Segundo Kawaguti (2005) a produção da cerâmica vermelha é definida pelos seguintes processos: sazonalidade, preparação de massa, conformação, secagem e queima. Tal processo está esquematizado na Figura 5.

Figura 5 – Etapas produtivas das indústrias de cerâmica vermelha (olarias).



Fonte: Autoria Própria

De acordo com Dadam (2005) é durante a queima dos produtos que são adquiridas suas características definitivas como cor, porosidade e resistência mecânica. Na queima, também conhecida como sinterização, as peças secas são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que se situam entre 800°C a 1200°C.

A queima é dividida em três fases: aquecimento controlado (o forno é aquecido da temperatura ambiente até a temperatura desejada), patamar (o forno mantém sua temperatura para a sinterização) e resfriamento controlado (a temperatura reduz-se até a temperatura ambiente). No caso de cerâmica vermelha, este ciclo tem duração de dois a três dias. Nesta etapa, encontra-se toda a demanda de energia térmica do processo de fabricação, exceto quando a secagem é feita com a utilização de ar quente (KAWAGUTI, 2005).

A primeira fase, de aquecimento, é onde a emissão de poluentes é mais crítica, pois as condições de combustão ainda são instáveis. Conforme Dadam (2005) os fornos podem ser classificados, basicamente, como intermitentes e contínuos, em função de como a queima é realizada. Eles são considerados intermitentes quando sua produção é feita por batelada, com as seguintes etapas: carga do forno; aquecimento; queima; resfriamento; e descarga. Esta característica faz com que o aproveitamento energético do processo seja pequeno, pois a estrutura do forno é aquecida e resfriada durante cada ciclo de produção. Hoje, a utilização deste tipo de forno é indicada para pequenas produções, para uma gama muito ampla de produtos e massas e para produtos onde uma carga sobre uma vagoneta torna-se inviável.

Ainda segundo Dadam (2005), os fornos contínuos são aqueles em que a queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças. Nestes fornos, enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outro lote está iniciando, sem descontinuidade do processo. Comparativamente aos fornos intermitentes, os fornos contínuos são mais econômicos e produtivos,

mas possuem um custo de implantação maior, sendo mais comuns em plantas de maior porte. Nestes fornos, as perdas para aquecimento da estrutura tornam-se negligenciáveis, uma vez que o forno opera continuamente. A emissão de poluentes, teoricamente, também é reduzida devido à manutenção das condições de combustão.

Os principais poluentes atmosféricos emitidos durante a produção de cerâmicas são o material particulado (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x), os óxidos de enxofre (SO_x), o monóxido de carbono (CO), compostos clorados e fluoretados. A emissão de particulados ocorre tanto na manipulação e transporte da matéria-prima (emissões fugitivas) quanto pela queima nos fornos. Já a emissão dos gases ocorre devido a combustão e está vinculada à composição da matéria-prima e do combustível empregado (USEPA, 1996). Os óxidos de nitrogênio formam-se pela fixação térmica no nitrogênio atmosférico durante a combustão. Já os óxidos de enxofre são provenientes principalmente da constituição da matéria-prima (mas também podem se originar do combustível, no caso do emprego de carvão ou óleos). O monóxido de carbono é formado tanto pela queima incompleta como pela dissociação de carbonatos da argila. A emissão de compostos halogenados depende majoritariamente da composição da matéria-prima usada (UE, 2007; RERIC, 2003).

2.7. O SETOR CERÂMICO EM SANTA CATARINA

A produção de cerâmica em Santa Catarina (em seu termo amplo, englobando todas as atividades) é um dos setores industriais mais importantes. Constitui 675 indústrias, empregando 19,6 mil trabalhadores, produzindo em torno de 2,6% do valor de transformação industrial catarinense, sendo que os destaques são as indústrias de revestimento de parede, piso e porcelanato, além da cerâmica vermelha (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA - FIESC, 2014).

Conforme a FIESC (2014), há uma grande predominância de microempresas no ramo, sendo que essas empresas de porte menor são importantes empregadores, como é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Número de empresas e empregados do setor cerâmico em Santa Catarina por porte.

Tamanho da empresa	Número de empregados	Número de empresas
Micro	3.601 (18,4%)	535 (79,3%)
Pequena	4.131 (21,1%)	110 (16,3%)
Média	6.417 (32,8%)	26 (3,9%)
Grande	5.429 (27,7%)	4 (0,6%)
TOTAL	19.578 (100,0%)	675 (100,0%)

Fonte: Adaptado de FIESC (2014)

O sul do estado abriga 318 empresas do setor (47% das indústrias desse setor no estado). Como comparação, um levantamento realizado pela União Europeia (2007) constatou 238 fábricas do setor na Itália são 238, 183 na Alemanha, 150 em Portugal, 136 na França e 134 no Reino Unido. Segundo a Relação Anual de Informações Sociais do Ministério de Trabalho e Emprego (MTE, 2013), a região sul de Santa Catarina é a segunda mesorregião do Brasil com maior número de indústrias desse setor (perdendo apenas para a de Campinas/SP).

No contexto econômico das indústrias de cerâmica vermelha Redivo (2007), ressalta a existência de deficiências na gestão das empresas do sul de Santa Catarina, sendo os principais motivos: estrutura administrativa inadequada; falta de preparo dos gestores; e os processos de produção artesanais. Redivo também aponta para a falta de controle de informações internas, o que dificulta a tomada de decisão dos empresários. Esse ponto também é enfatizada por Cunha (2002) levantando a falta de qualificação profissional como sendo uma das responsáveis pela fragilidade econômica do setor. Procurando melhorar o contexto, iniciativas foram tomadas pelo Serviço de Apoio à Micro e Pequenas Empresas de Santa Catarina (SEBRAE/SC) e pelo Instituto Evaldo Lodi (IEL, vinculado a Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina, FIESC) com o objetivo de melhorar a situação de tais empresas.

No aspecto ambiental, Santa Catarina (1990) cita problemas das olarias com a extração irregular de madeira nativa. Cunha (2002) descreve problemas sobre a extração ilegal de argila, a falta de licenças ambientais e o impacto da qualidade do ar da região, resultante da atividade dessas indústrias. No sentido de reduzir a degradação ambiental da região, o Ministério Público de Santa Catarina (MP/SC, 2007) instituiu um programa de prevenção e repressão à poluição atmosférica, sob forma de um Termo de Compromisso e Ajustamento de

Conduas (TAC), assinado no ano de 2004. As partes signatárias do acordo foram o MP/SC, comarcas da região (Criciúma, Tubarão, Urussanga, etc.), a Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA), a Polícia Ambiental, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), SINDICER (Sindicato da Indústria da Cerâmica Vermelha), COOPEMI (Cooperativa de Exploração Mineral) e o Sindicato das Indústrias de Cerâmica de Revestimentos (Sindiceram). Tal TAC teve os seguintes objetivos:

- Preservação dos cursos d'água e demais áreas ambientalmente protegidas, com a disciplina e adequação legal do uso do solo nas jazidas de extração de argila;
- Recuperação dos passivos ambientais, consubstanciados nas cavas de extração a céu aberto;
- Controle das emissões atmosféricas.

Em 2006, foi feito um termo aditivo de retificação e ratificação visando uma adequação a questões técnicas. Ainda de acordo com o MP/SC (2007), no ano de 2005 a qualidade do ar passou a ser monitorada nas regiões com maior concentração de olarias (Morro da Fumaça e Morro Grande). A partir do ano de 2006, a análise e expedição das licenças de operação da FATMA, para olarias, ficou condicionada a um cronograma prevendo a instalação de equipamentos de controle de poluição do ar. Entretanto, o texto não deixa claro se a eficiência de remoção de poluentes deve ser de no mínimo 80%, ou se a emissão de poluentes não pode ultrapassar 80% do limite estabelecido pela legislação vigente.

Uma vez que há uma concentração de cerâmicas em uma área geográfica restrita, e mesmo considerando-se que há uma preponderância de indústrias de pequeno porte no setor cerâmico, espera-se que haja um impacto na qualidade do ar do local. Conforme Co *et al.* (2009) os esforços legais para a restrição de emissões estão principalmente focados em indústrias de grande porte. A contribuição de pequenas fábricas para a deterioração da qualidade do ar, na maioria dos casos, é desconhecida.

Os municípios da região sul de Santa Catarina nos quais as olarias estão presentes apresentam qualidade do ar que, quando da execução de monitoramento, excedeu os padrões estabelecidos pelo CONAMA, estabelecidos por meio da Resolução n. 3, de 1990. Tal fato foi constatado conforme o levantamento realizado por Souza e Pavei

(2010) das medições de qualidade do ar realizadas entre 1993 e 2009. Apesar do monitoramento ter sido feito com uma resolução temporal e espacial esparsa, violações dos padrões foram observadas. Para o dióxido de enxofre (SO₂) foi verificada a ultrapassagem do padrão primário anual em um ponto de monitoramento de Criciúma (no ano 2000), além da ocorrência de 4 violações do padrão primário de qualidade do ar diário desse poluente em um mesmo ano, no mesmo local. Entretanto foi em um ponto de monitoramento em Morro da Fumaça o local em que foi verificado o maior número de ultrapassagens do padrão diário de SO₂, além de em um dos dias ter superado o nível de atenção para a qualidade do ar (concentração superior a 800 µg.m⁻³).

Ainda conforme Souza e Pavei (2010), para o particulado total em suspensão (PTS) foram observadas ultrapassagens do padrão anual de qualidade do ar em dois pontos de monitoramento, um em Criciúma (no ano de 1997) e outro em Morro da Fumaça (nos anos de 1994 e 1996). Já para o particulado inalável (MP₁₀), em um ponto monitorado em Morro da Fumaça, a concentração média diária atingiu 177 µg.m⁻³, superior ao padrão que é de 150 µg.m⁻³, em um dos dois dias monitorados no ano de 2002 (SOUZA e PAVEL, 2010).

Os efluentes atmosféricos gerados pela atividade das olarias estão estreitamente relacionados com os combustíveis utilizados nos fornos de cozimento da argila, sejam os fornos de atividade contínua ou intermitente. Levantamentos feitos por Santa Catarina (1990), Souza (1998 apud CUNHA, 2002) e Cunha (2002), no sul de Santa Catarina, demonstraram o panorama dos combustíveis utilizados pela atividade oleira do sul do estado. Os dados resultantes dos estudos encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Porcentagem de olarias usando cada combustível.

Fonte	Lenha	Carvão Mineral	Óleo BPF	Rejeitos de Madeira	Serragem	Outros
Santa Catarina (1990)	68,9%	12,3%	10,5%	5,5%	2,2%	0,6%
Souza (1998)	68,2%	-	1,5%	-	18,2%	9,1%
Cunha (2002)	66,0%	-	-	32,0%	2,0%	-

Fonte: Adaptado de Cunha (2002).

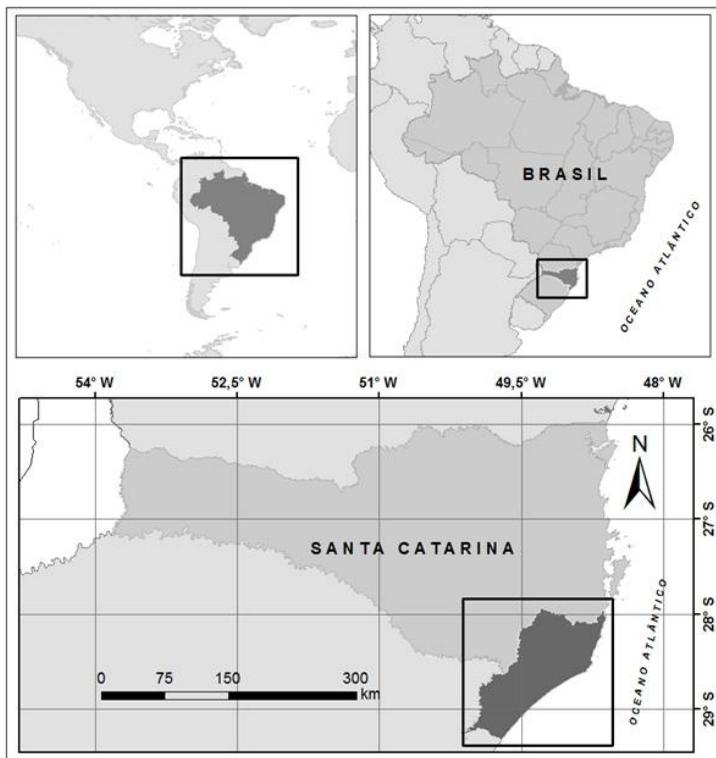
Conforme Santa Catarina (1990) em todo estado eram consumidos cerca de 114.325 m³ de lenha por mês, sendo que a região sul apresentou a melhor relação Energia/Produto (nesse caso tijolos) dos pólos de cerâmica estudados (1,22 Gcal/mil unidades, contra 3,09 Gcal/mil unidades da região oeste e 2,14 na região norte). Já Cunha (2002), em seu estudo na região de Morro da Fumaça, estimou que um volume de 7.872 m³ de combustíveis é consumido por mês, pelas 22 olarias amostradas em seu estudo. Tal valor corresponderia a 1/3 das olarias do município. Esses dados apontam a queima de biomassa (madeira) como a principal forma de obtenção de energia térmica para a cura das peças de cerâmica. Como comparação, o combustível mais utilizado nas fábricas de telhas e tijolos da Alemanha (UE, 2007) é o gás natural, com 88,6% do consumo. No Reino Unido, o gás natural também é o combustível mais usado nessas indústrias (BRICK DEVELOPMENT ASSOCIATION, 200-?).

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Caracterização da área de estudo

O local que serviu como estudo de caso foi o Sul de Santa Catarina, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Localização da área de estudo

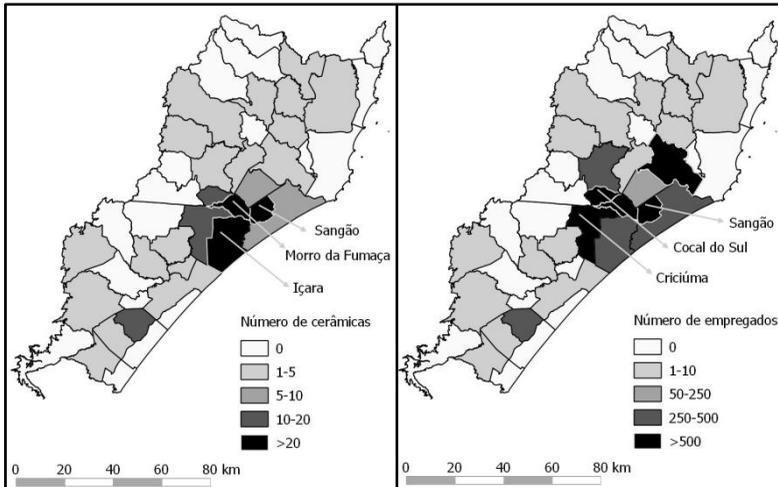


Fonte: Autoria própria.

Há uma concentração geográfica de empresas de produção de cerâmica na região. Na Figura 7 são mostradas as distribuições das empresas e dos trabalhadores envolvidos na produção de cerâmica nos municípios do Sul de Santa Catarina. Os três municípios com maior número de indústrias cerâmicas, conforme o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 2013) são Sangão (96), Morro da Fumaça (56) e Içara

(37). Já as cidades que mais empregam pessoas nesse setor são Criciúma (3.356), Sangão (2.146) e Cocal do Sul (1.539).

Figura 7 - Concentração de empresas e nº de empregados na produção de cerâmicas no Sul catarinense.

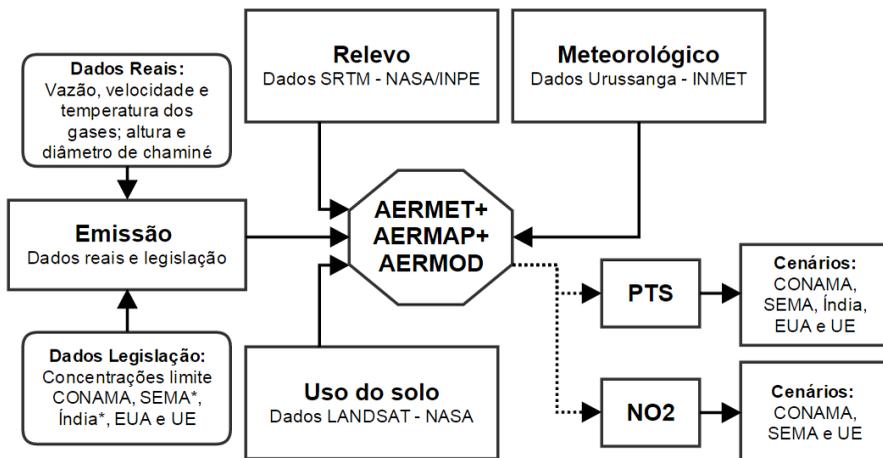


Fonte: Adaptado de MTE (2013).

3.2. MODELO AERMOD

Uma das funções da modelagem da qualidade do ar é a possibilidade de se verificar a efetividade de normativas de maneira não dispendiosa. Para identificar se os padrões de emissão avaliados são suficientes para se garantir a qualidade do ar foram realizadas simulações com o modelo AERMOD, recomendado pela USEPA. Os dados de entrada requeridos pelo AERMOD são: emissão (altura, taxa, temperatura, velocidade), relevo do terreno, meteorológicos, uso do solo e receptores (locais onde foram calculadas as concentrações). A Figura 8 apresenta um fluxograma dos dados de entrada utilizados na modelagem.

Figura 8 - Origem dos dados e etapas do trabalho.



*Os cenários de emissões da SEMA e Índia tiveram alturas de chaminés mínimas (10 m e 22 m)

Fonte: Autoria própria.

Ainda há a possibilidade de se adicionar valores de concentração de fundo (*background*) aos resultados da modelagem. Porém, isso não foi realizado devido à ausência de dados representativos de monitoramento de qualidade do ar no local. A seguir, será explanado como foram coletados/gerados cada um desses dados de entrada do modelo.

3.2.1. Dados de emissão

Os dados de emissão a serem empregados foram provenientes de uma campanha de pesquisa do Laboratório de Controle da Qualidade do Ar, da Universidade Federal de Santa Catarina, no período de janeiro a dezembro de 2012. Nessa campanha foram coletados laudos de emissão atmosférica, vinculados ao licenciamento ambiental, junto a FATMA-SC. Ao todo foram coletadas informações de 151 olarias, sendo que dessas, apenas os documentos de 69 apresentavam os dados primordiais para a modelagem: o posicionamento geográfico (latitude e longitude). Além da localização, tais documentos também continham dados de emissão: a temperatura, a vazão dos gases (nas Condições Normais de Temperatura e Pressão - CNTP) e a velocidade das emissões atmosféricas; as dimensões da chaminé (altura e diâmetro) e a potência térmica nominal dos fornos. Para a modelagem, na ausência de

qualquer dado de medição, foi considerada mediana dos dados existentes. A Tabela 6 apresenta estatísticas descritivas dos dados efetivamente empregados nesse trabalho (descartando olarias sem dados de posicionamento e as que se localizam a distância superior a 12,5 km do centro de massa das olarias).

Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos dados de emissão das olarias.

	Lat. (m)	Long. (m)	T (K)	[MP] (mg.Nm⁻³)	Q (Nm³.h⁻¹)	V (m.s⁻¹)	h (m)	D (m)	PTN (MW)
N. de dados	69	69	58	58	57	57	56	57	30
Máximo	6.835.104	687.332	623	118	41.497	27,38	23	2	5,53
Mediana	6.827.008	676.232	329	82	7.863	4,78	12	0,8	0,94
Mínimo	6.820.623	670.496	300	30	2.009	1,53	6	0,3	0,03
Desvio padrão geom.²⁰	1,0	1,0	1,1	1,4	2,1	1,8	1,3	1,7	4,4

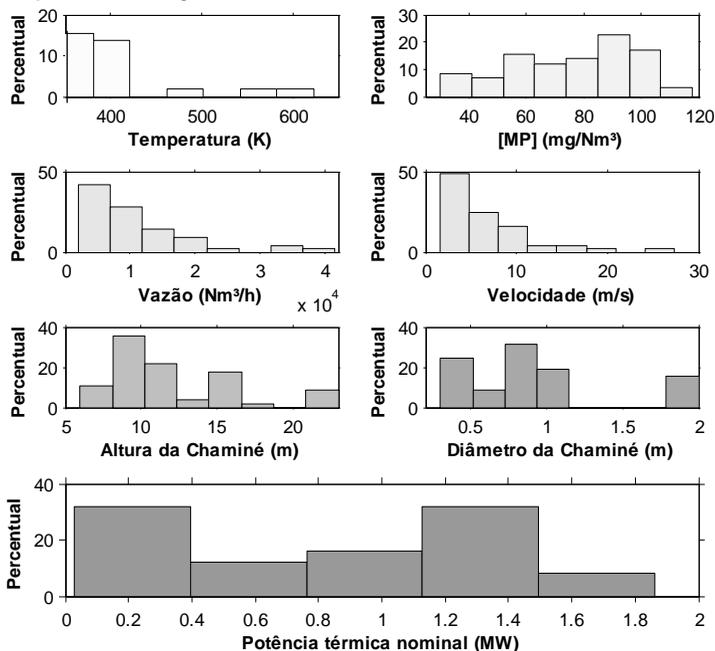
Lat.: Latitude (UTM, zona 22 J); Long.: Longitude (UTM, zona 22 J); T: Temperatura; Q: Vazão; h: Altura da chaminé; D: Diâmetro da chaminé; PTN: Potência térmica nominal.

Fonte: Autoria própria.

Na modelagem foram consideradas 69 olarias, ou seja, em torno de 22% das 318 indústrias cerâmicas da região levantadas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 2013). A Figura 9 apresenta histogramas dos mesmos dados da tabela anterior (exceto a latitude e longitude).

²⁰ O desvio padrão geométrico é adimensional.

Figura 9 - Histogramas dos dados coletados de emissão das olarias.



Fonte: Autoria própria.

Algumas simplificações foram empregadas nesse estudo. A latitude e longitude especificadas no documento, como a localização da indústria, foram assumidas como o posicionamento geográfico da chaminé que será simulada no modelo. Algumas olarias possuem mais de uma chaminé, e mais de um forno, porém considerou-se apenas uma chaminé e um forno por olaria. Todas as emissões foram tratadas como ocorrendo concomitantemente e de forma contínua. Não foi considerada a influência de edificações na dispersão de poluentes (*downwash*) devido à ausência de informações para que isto pudesse ser feito.

Para o estabelecimento das taxas de emissão a serem utilizadas, foram empregados 8 cenários de emissão: 5 para o PTS e 3 para o NO₂. Tais cenários consideraram as emissões no limite de suas respectivas regulamentações. Não foram considerados outros poluentes, como o monóxido de carbono, devido à ausência de limites na maioria das legislações avaliadas. Para o PTS foram levados em consideração as concentrações limites já apresentadas no Item 2.4.2 desse trabalho: limite estabelecido pelo CONAMA (Resoluções 382/2006 e 436/2011), pela SEMA 16/2014, pelos Estados Unidos, pela União Europeia e pela

Índia. No caso da CONAMA e da SEMA, cujos limites de emissão dependem da potência térmica nominal, empregou-se os limites para a faixa de potência térmica nominal (PTN) inferior a 10 MW, pois os fornos das olarias avaliadas não superam tal valor. O combustível considerado foi a lenha e seus derivados (devido a predominância do uso na região sul de SC). Portanto, para a CONAMA foi utilizado o capítulo IV (independente da resolução, pois ambas trazem o mesmo limite de emissão), e quanto a SEMA, o item IV do artigo 22. No caso do limite de emissão dos Estados Unidos, considerou-se o limite de concentração, já que o limite em função da produção carece de dados para ser estabelecido. Para União Europeia e para a Índia, o padrão de emissão considerado foi o mais crítico (com potencial de causar o maior impacto). O Quadro 21 sumariza os valores de concentração de emissão para cada um dos cenários e a altura mínima de chaminé. Não foram consideradas as diferentes correções para os teores de oxigênio estabelecidos para cada regulamentação para simplificar os cenários.

Quadro 21 - Concentrações e altura mínima de emissão para cada cenário.

	CONAMA	SEMA	Índia	Estados Unidos	União Europeia
Concentração MP (mg.Nm⁻³)	730	560	1000	92	50
Concentração NO_x (mg.Nm⁻³)	650	500	-	-	250
Altura mínima de chaminé (m)	-	10	22	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para uma comparação da influência da altura das chaminés no impacto, no cenário da SEMA foi considerado uma altura mínima de chaminé de 10 metros (estabelecida pela mesma resolução) e no cenário do limite de emissão indiano considerou-se uma altura mínima de 22 metros.

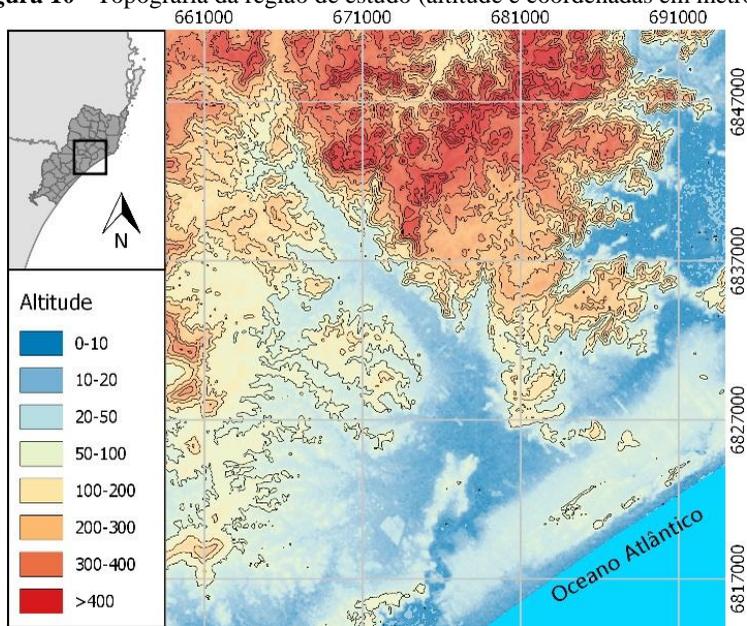
Para o caso do NO_x foram considerados os limites de emissão estabelecidos pelo CONAMA, pela SEMA e pela União Europeia (não há limites para a emissão desses poluentes, para a indústria cerâmica, nem na Índia, nem nos Estados Unidos). Para o caso do CONAMA e da SEMA, não há limite de emissão para a faixa abaixo de 10 MW de potência térmica nominal, portanto utilizou-se o limite da faixa superior (entre 10 e 50 MW), que são iguais a 650 e 500 mg.Nm⁻³ respectivamente. Já para o cenário da União Europeia, o padrão de

emissão considerado foi o de 250 mg.Nm³. Para a SEMA, o mesmo critério para a altura das chaminés do PTS foi usado para o NO_x.

3.2.2. Dados de relevo

A informação sobre o relevo é essencial para a determinação da altura dos receptores (pontos em que foram calculadas as concentrações). Foram empregados os dados de elevação do terreno provenientes da Agência Espacial Americana (*National Space Agency - NASA*), da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Essa missão durou 11 dias (entre 11 e 22 de fevereiro de 2000), nos quais mapeou 80% da superfície terrestre, correspondendo todo o território entre 60° norte e 56° sul de latitude (USGS - *United States Geological Survey*, 2009; NASA, 1998). Os dados de elevação foram coletados com 3 arcos-segundo de resolução (o que significa 90 metros sobre a linha do Equador). Os dados utilizam o *datum* horizontal WGS84 (posteriormente convertidos ao SIRGAS 2000) e o *datum* vertical EGM96. Os dados de relevo foram coletados pelo SRTM por meio da técnica de interferometria, com o uso de dois sensores transportados pela nave *Endeavour* (USGS, 2009). Os dados do SRTM estão disponíveis no *site*²¹ do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A Figura 10 ilustra a topografia da região de estudo, obtida por meio dos dados do SRTM.

²¹<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

Figura 10 - Topografia da região de estudo (altitude e coordenadas em metros).

Datum: SIRGAS 2000; Zona UTM 22J

Fonte: Adaptado de INPE (2014).

Os mapas de elevação, disponibilizados pelo INPE, passaram por processo de refinamento, que consistiu na interpolação de dados com o uso de coeficientes geoestatísticos empíricos, derivados de testes extensivos com os dados do território brasileiro (INPE, 2010).

Além de serem empregados para a determinação da cota dos receptores e de barreira física, os dados do SRTM também foram utilizados para estabelecer a cota da base das chaminés empregadas.

3.2.3. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos a serem utilizados dividem-se em dados de superfície: velocidade (m/s) e direção (°) do vento, pressão atmosférica (mbar), umidade relativa (%), dentre outros; e dados de sondagem (*upper air*): perfil de temperatura e de velocidade do vento. Foram pesquisadas 4 estações meteorológicas para compor a base de dados: 3 de propriedade do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM): Içara, Criciúma e Tubarão; e uma pertencente ao Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET), localizada em Urussanga. Entretanto, os dados fornecidos pelo CIRAM estavam em taxas diárias. O modelo exige dados horários. Por conseguinte, os dados de superfície empregados foram da estação meteorológica de Urussanga (código WMO: 83923), distante 20 km da mediana das latitudes e longitudes das olarias. Já os dados de sondagem aplicados no modelo foram oriundos do aeroporto de Florianópolis (Código WMO: 83899), que dista 130 quilômetros do centro da área de estudo. Tais dados foram coletados a uma distância significativa do local de estudo, porém outras alternativas estariam a distâncias ainda maiores (Porto Alegre e Curitiba).

O período dos dados meteorológicos compreendeu 5 anos (de 01 de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2013). Para avaliar a consistência destes dados, foi feita uma comparação das médias mensais (das medições horárias) de parâmetros meteorológicos do período avaliado, com as normais climatológicas (de 1961 a 1990) da mesma estação (fornecidas pelo INMET²²). Tal comparação pode ser vista na Tabela 7. **Tabela 7** - Comparação das normais climatológicas com as médias mensais os dados coletados e intervalo de confiança de 95%..

Tabela 7 - Comparação das normais climatológicas com as médias mensais os dados coletados e intervalo de confiança de 95%.

	Temperatura Média (°C)		Umidade Relativa (%)		Pressão atmosférica (mbar)		Precipitação (mm)	
	Normais	Medidos (IC95%)	Normais	Medidos (IC95%)	Normais	Medidos (IC95%)	Normais	Medidos (IC95%)
Jan.	23,8	23,8±0,3	80,9	80,0±0,8	1006,8	1007,6±0,1	192,3	290,2±0,4
Fev.	23,9	24,9±0,4	82,9	79,9±0,8	1007,4	1007,6±0,1	213,0	203,3±0,8
Mar.	22,7	22,9±0,3	84,2	80,2±0,8	1008,6	1009,5±0,1	186,5	169,4±0,4
Abr.	19,8	20,7±0,1	83,9	80,5±0,5	1010,9	1011,7±0,1	86,8	70,6±0,5
Mai.	17,0	17,9±0,2	85,4	82,4±0,6	1012,8	1013,1±0,1	83,4	119,0±1,0
Jun.	14,9	15,4±0,4	85,4	82,6±0,4	1013,3	1014,2±0,1	79,5	84,3±0,2
Jul.	14,7	14,8±0,4	84,4	80,9±0,4	1014,4	1015,3±0,1	107,2	95,2±0,2
Ago.	15,7	16,6±0,9	82,5	77,3±0,6	1013,2	1014,9±0,1	144,9	181,8±0,6
Set.	17,1	17,9±0,3	82,5	78,1±0,8	1012,7	1013,4±0,1	153,2	176,8±0,7
Out.	19,0	19,9±0,6	79,9	77,0±0,4	1010,9	1010,4±0,1	122,3	96,8±0,3
Nov.	21,0	22,1±0,6	78,4	75,0±0,8	1008,4	1008,4±0,1	125,6	111,8±0,9
Dez.	22,8	23,7±0,5	78,7	76,7±0,6	1007,4	1006,5±0,1	141,0	143,2±0,3

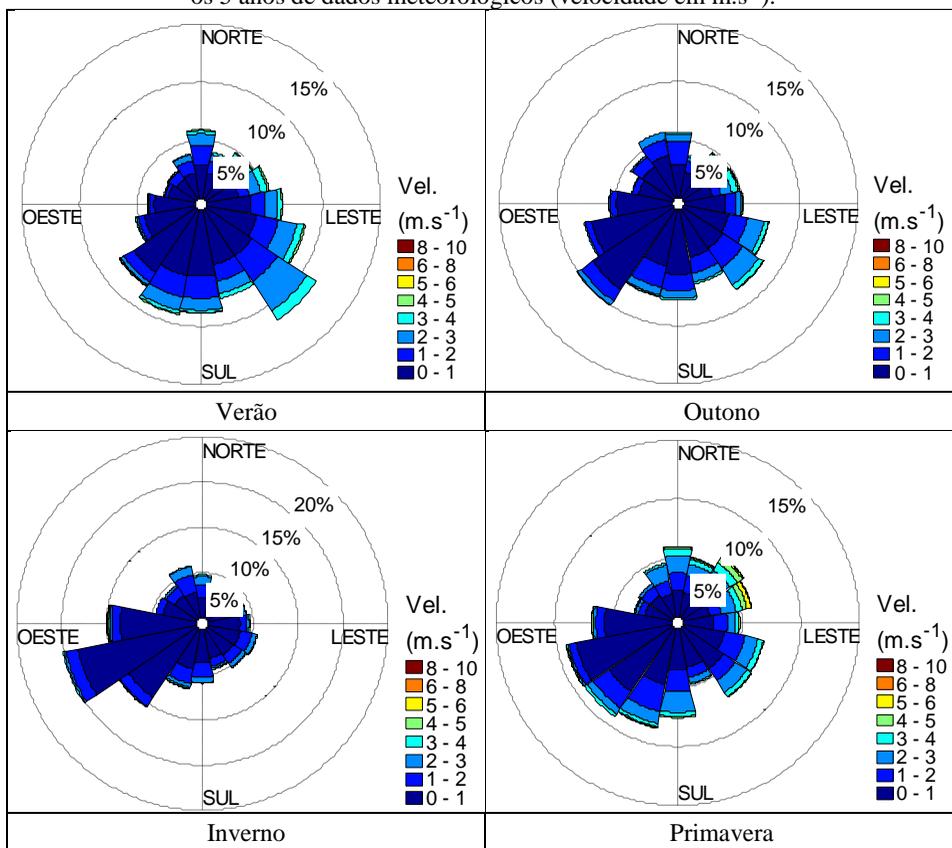
Fonte: Autoria própria.

²² Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>

Os dados coletados, de certa forma, acompanham a variabilidade temporal das normais. A direção predominante do vento, bem como a intensidade, para cada estação do ano, podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11 - Rosas dos ventos (proveniência) para cada estação do ano, usando os 5 anos de dados meteorológicos (velocidade em $m.s^{-1}$).



Fonte: Autoria própria.

Há uma predominância de ventos fracos, sendo que no verão há a incidência de ventos mais intensos, provenientes do quadrante Sul/Leste. Já no inverno, a predominância é de ventos fracos, provenientes do Sul. Tais dados corroboram com as normais climatológicas do INMET, que apontam a predominância de calmarias durante todo o ano.

3.2.4. Dados de cobertura do solo

No 3º estágio do AERMET (pré-processador meteorológico) há a necessidade de fornecer dados de cobertura do solo. Tal parâmetro é necessário para determinar os valores de albedo, de razão de Bowen²³ e de rugosidade da superfície. Foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 8, fornecidas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS - *United States Geological Survey*) em seu *site*²⁴, utilizando como critério, além da data, a baixa obstrução de nuvens (menor que 10%). A imagem utilizada foi captada no dia 26 de agosto de 2014. Ela foi recortada, para o seu centro estar na mediana das latitudes e longitudes das fábricas, e possuir dimensões de 25 km por 25 km. A imagem foi então dividida em 4 setores quadrados, cada um com cada aresta medindo 12,5 km. O AERMOD aceita até 12 setores, mas não havendo recomendação optou-se por quatro setores por simplificação. A divisão dos quatro setores é apresentada na Figura 12.

O LANDSAT é um projeto que iniciou no ano de 1972 e atualmente, está em seu oitavo satélite, cujo dado foi utilizado. O Landsat 8 está em funcionamento desde 11 de fevereiro de 2013. O satélite orbita a 705 quilômetros de altitude, rastreamento a Terra com um feixe de 185 km de largura, em uma órbita descendente (do norte para o sul) que dura em torno de 99 minutos. Ele carrega dois sensores: o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O OLI coleta dados em 9 bandas de radiação refletida de onda curta, já o TIRS captura dados em duas bandas de ondas longas (USGS, 2012). Para a caracterização do uso do solo, foram apenas empregadas 6 bandas, coletadas pelo OLI (onda curta): banda 2, banda 3, banda 4, banda 5, banda 6, banda 7. O Quadro 22 **Quadro 22** apresenta uma descrição das bandas a serem empregadas.

²³ Razão entre calor sensível e latente de uma determinada superfície.

²⁴ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Quadro 22 - Características das bandas eletromagnéticas, detectadas pelo satélite LANDSAT 8, utilizadas no presente trabalho.

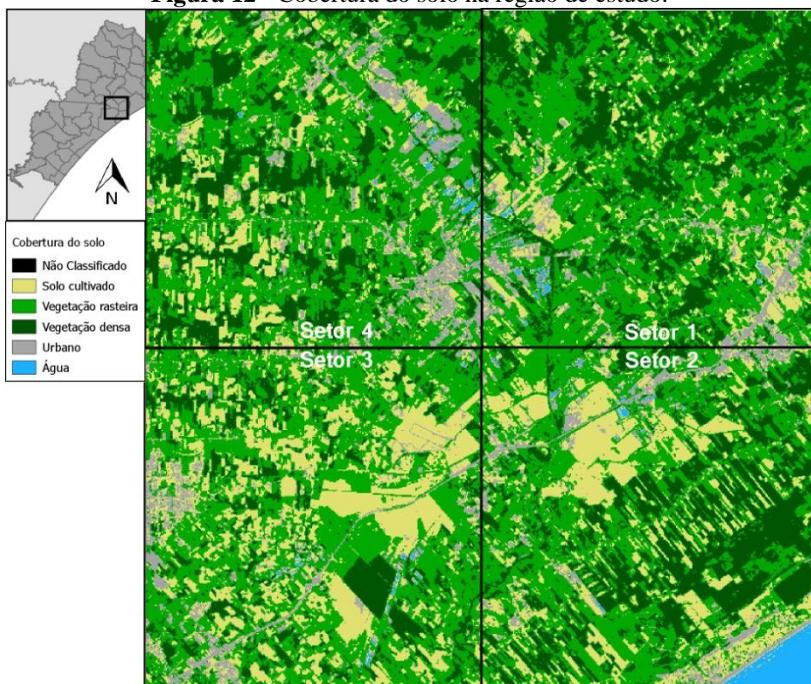
Banda espectral	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
2 - Azul	0,45-0,51	30
3 - Verde	0,53-0,59	
4 - Vermelho	0,64-0,67	
5 - Infravermelho próximo	0,85-0,88	
6 - SWIR²⁵ I	1,57-1,65	
7 - SWIR II	2,11-2,29	

Fonte: Adaptado de USGS (2012).

As imagens foram trabalhadas no programa de Sistema de Informação Geográfico (SIG) *Quantum GIS* (versão 2.4.0), e sua extensão para a classificação semi-automática do uso do solo (*semi-automatic classification*, versão 3.1.5) conforme instruções do manual da extensão (CONGEDO, 2014). O primeiro passo é a definição de regiões de interesse (ROI), locais que possuem refletâncias similares do espectro de radiação avaliado. Ao selecionar diferentes coberturas, o programa detecta *pixels* espectralmente análogos. Após a seleção dos locais de interesse, que para esse trabalho totalizou 11 regiões, é rodado o algoritmo de classificação. As 11 regiões de interesse são correspondentes a 5 classes de cobertura do solo: cultivado, vegetação rasteira, vegetação densa, urbanizado e água. A Figura 12 apresenta o resultado da classificação semi-automática do uso do solo na área de estudo.

²⁵ *Shortwave infrared*: Infravermelho de curto comprimento de onda.

Figura 12 - Cobertura do solo na região de estudo.



Fonte: Adaptado de NASA (2014).

Após a classificação do uso do solo na área de estudo foi realizado um pós processamento, onde a contagem de *pixels* (que é proporcional à área) vinculada a cada um dos tipos de uso do solo foi realizada para cada setor. O percentual da área de cada setor, ocupado por cada tipo de cobertura do solo é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Percentual da cobertura do solo em cada um dos 4 setores.

Classificação da área	Percentual da área (%)			
	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4
Cultivo	7,6%	16,6%	18,0%	9,7%
Vegetação rasteira	46,6%	35,2%	46,0%	49,1%
Vegetação densa	34,7%	32,0%	17,5%	26,2%
Urbano	9,8%	12,0%	17,1%	14,0%
Água	1,3%	4,2%	1,4%	1,0%
Total	100%	100%	100%	100%

Fonte: Autoria própria.

Os valores para o albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície são os parâmetros exigidos pelo AERMET em cada um dos setores. Esses parâmetros foram determinados com o uso dos coeficientes constantes no manual do processador AERMET (USEPA, 2004c), para cada estação do ano e para cada setor. Para os valores de razão de Bowen, os dados de umidade média foram utilizados. Os dados presentes no manual do AERMET, referentes ao inverno, consideram a presença de neve, pois foram determinados para os Estados Unidos. Foi feita então uma média entre os valores dos parâmetros do inverno e do outono. Cada tipo de cobertura do solo teve o valor de seu parâmetro (albedo, razão de Bowen e rugosidade) multiplicado pelo percentual de cobertura de cada setor, e então somado ao resultado das mesmas multiplicações dos outros tipos de cobertura. As somas resultaram então, nos valores de cada um dos três parâmetros, para cada setor, para cada estação do ano. Os dados desses parâmetros requeridos pelo AERMET estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 - Albedo, razão de Bowen e rugosidade da superfície em cada um dos setores da área.

Setor	Albedo				Razão de Bowen				Rugosidade da superfície			
	Prim.	Ver.	Out.	Inv.	Prim.	Ver.	Out.	Inv.	Prim.	Ver.	Out.	Inv.
1	0,151	0,158	0,168	0,160	0,552	0,713	1,064	0,808	0,471	0,612	0,385	0,428
2	0,147	0,158	0,166	0,156	0,539	0,706	1,033	0,786	0,463	0,605	0,388	0,426
3	0,155	0,169	0,178	0,166	0,533	0,854	1,104	0,819	0,374	0,480	0,324	0,349
4	0,154	0,163	0,174	0,164	0,550	0,802	1,102	0,826	0,430	0,549	0,360	0,395

Prim.: Primavera; Ver.: Verão; Out.: Outono; Inv.: Inverno

Fonte: Autoria própria.

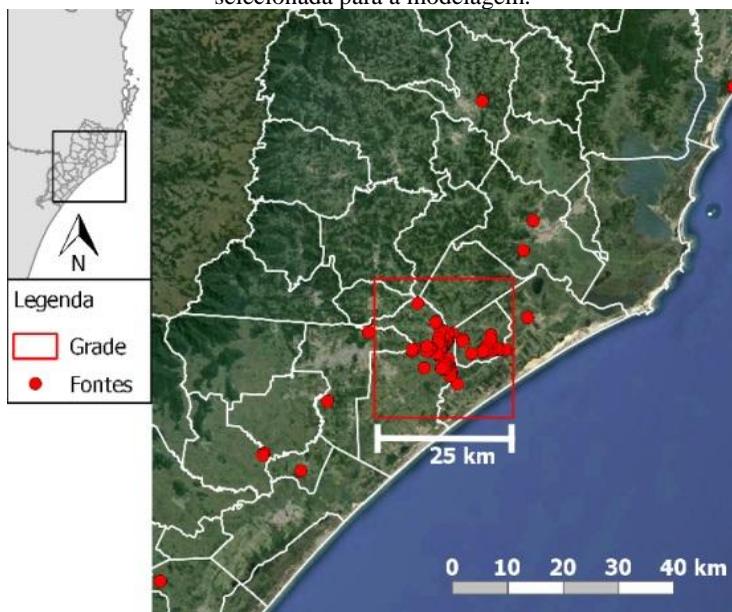
3.2.5. Receptores

Os receptores significam os locais onde foram calculadas as concentrações ambientais dos poluentes. Nesse estudo, foram empregados 2 tipos de receptores: grade (cartesianos) e discretos. A definição do tamanho da grade depende essencialmente de 2 fatores: localização das indústrias e o tempo computacional. A grade foi alocada para abranger a maior parte das chaminés, porém, levando em consideração a otimização da performance computacional.

A grade cartesiana de receptores foi definida através de um teste inicial, com uma grade quadrada (25 km de lado) centrada na mediana das coordenadas geográficas das olarias, e de espaçamento de 100 metros (totalizando 62.500 receptores). O modelo AERMOD levou 5

dias para completar os cálculos de dispersão dos 5 anos avaliados. A Figura 13 apresenta a localização das olarias em relação a extensão da grade preliminar selecionada. A figura mostra o posicionamento das 69 olarias em relação à grade preliminar, além de outras 11 olarias situadas externamente à grade.

Figura 13 - Localização das fontes de emissão (olarias) levantadas e da grade selecionada para a modelagem.



Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que os eventos mais críticos quanto as concentrações ambientais de poluentes predominantemente ocorriam na área com maior densidade de indústrias, em Morro da Fumaça e Içara, além de uma região de Sangão, a qual possui um relevo mais acentuado. Foi feito então, um aninhamento de grades. Uma grade maior (similar a inicial, apenas com espaçamento de 250 metros, Grade 1) foi considerada. Dentro dessa grade, nos locais onde foram previamente verificadas as maiores concentrações, foram criadas mais três grades: uma em Içara (Grade 2), Morro da Fumaça (Grade 3) e Sangão (Grade 4). Essas grades internas, quadradas com 5 km de lado, foram preenchidas com receptores a cada 100 metros.

A Tabela 10 detalha as grades empregadas na modelagem.

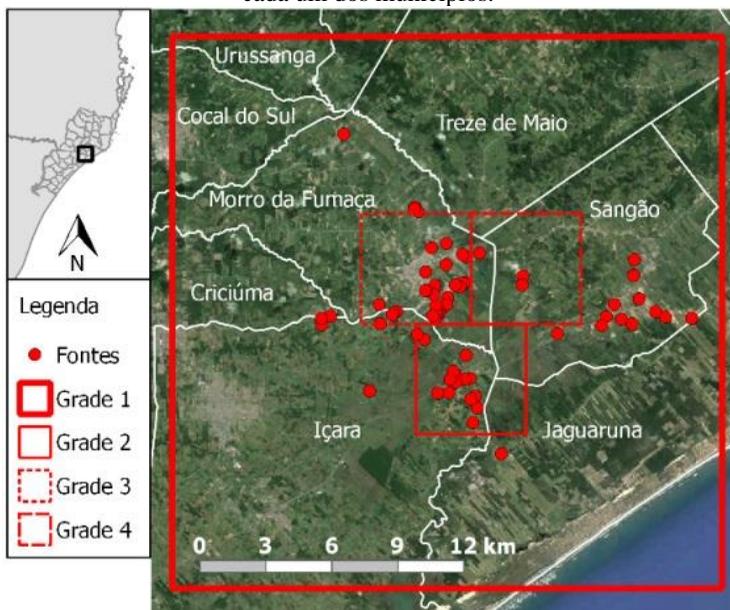
Tabela 10 - Características das grades utilizadas no estudo.

N. da Grade	Longitude do centro (UTM, m)	Latitude do centro (UTM, m)	Tamanho da grade (km)	Espaçamento receptores (m)	N. de receptores
1	676.212	6.827.024	25 x 25	250	10.000
2	677.300	6.824.000	5 x 5	100	2.500
3	674.800	6.829.000	5 x 5	100	2.500
4	679.800	6.829.000	5 x 5	100	2.500

Zona UTM 22J

Fonte: Autoria própria

Quanto aos receptores discretos, eles foram avaliados em um segundo momento. O posicionamento deles deu-se nos pontos críticos, onde ocorreram as maiores concentrações na modelagem dos receptores cartesianos. A Figura 14 ilustra as grades cartesianas empregadas, a localização das fontes e os limites municipais.

Figura 14 - Detalhamento da locação da grade de modelagem e das fontes em cada um dos municípios.

Fonte: Autoria própria.

3.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO, PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Documentos de órgãos ambientais reconhecidos foram utilizados como referência para a execução da modelagem e interpretação de resultados. Para esse estudo, foram utilizadas as versões mais atuais disponibilizadas pela USEPA do AERMOD e de seus processadores. A versão do AERMOD a ser executada foi a 14134 (lançada no dia 14 de maio de 2014), mesma versão do AERMET, processador de dados meteorológicos, que foi publicada no mesmo dia do AERMOD. Já o AERMAP (processador de dados de terreno) usou sua última versão 11103 (datada de 13 de abril de 2011). A configuração de execução do AERMOD foi a padrão para licenciamento ambiental (DEFAULT), que considera dados de entrada de terreno, rebaixamento de pluma na chaminé (*stack-tip downwash*), rotina de processamento de ventos calmos e de dados meteorológicos faltantes (USEPA, 2004). Tal opção não considera o decaimento de poluentes (Estados Unidos, 2005). Portanto, não foram consideradas reações físico-químicas de remoção ou formação de poluentes.

3.3.1. Procedimentos de modelagem

Algumas configurações para a execução do modelo são provenientes do "Manual para a elaboração de estudos para o licenciamento com avaliação de impacto ambiental" da CETESB (2014b), seu Anexo I. São considerados os seguintes aspectos:

- Usar espaçamento entre receptores na grade de no mínimo 500 m, e no entorno dos empreendimentos e pontos críticos um mínimo de 250 m (foi usado este espaçamento na grade maior, além de três grades refinadas de 100 m nas áreas críticas);
- Utilizar dados meteorológicos de cinco anos contínuos (o período de dados meteorológicos foi de 2009 a 2013);
- Conversão plena do NO_x para NO_2 (as emissões de NO_x foram consideradas equivalentes a de NO_2);

Além disso, considerou-se um valor de altura em relação ao solo (*flagpole*) para cálculo de concentrações de 1,5 metro.

3.3.2. Apresentação dos resultados

A demonstração dos resultados seguirá o exposto no “Guia de boas práticas para a modelagem de dispersão atmosférica (*Good practice guide for atmospheric dispersion modelling*)”, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente da Nova Zelândia (Nova Zelândia, 2004):

- Apresentação de mapa das máximas concentrações obtidas na modelagem nas escalas temporais curtas (horária e diária) e longa (anual);
- Tabela com o *ranking* dos 50 maiores valores modelados para as médias de curto prazo (horárias, diárias) e 10 maiores valores para as médias de longo prazo (anuais);
- Identificação dos receptores críticos (receptores discretos onde ocorrem as maiores concentrações);
- Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar (foi comparado ao padrão primário).

Para os receptores críticos (discretos), percentis foram avaliados. Conforme Nova Zelândia (2004), o uso de percentis torna os resultados mais robustos, uma vez que se aproximam mais da realidade. Os dados de concentração em um receptor específico normalmente possuem uma grande assimetria (*skewness*). Isso se deve ao fato dos resultados de pico da modelagem serem extremamente sensíveis à incertezas, fato que é atenuado quando se considera um valor de percentil. Foi então avaliado o 98º percentil para o PTS (ESTADOS UNIDOS, 2005), pois esse é um parâmetro para avaliação da qualidade do ar nos Estados Unidos para as partículas inaláveis finas (MP_{2,5}). Para o dióxido de nitrogênio, foi avaliado o 99,78º percentil, conforme a legislação europeia de qualidade do ar, que preconiza que as concentrações horárias desse poluente não podem extrapolar 200 µg.m⁻³ mais de 18 vezes por ano (EUROPEAN TOPIC CENTRE, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de 43.824 horas foram processadas no modelo AERMOD para cada cenário, cujos resultados estão na sequência. Relembrando que são cinco cenários para o PTS (CONAMA, SEMA, Índia, Estados Unidos e União Européia) e três para o NO₂ (CONAMA, SEMA e União Européia). Os cenários apresentam condições hipotéticas de concentração (limites de emissões de cada regulamentação) com dados medidos de condição de lançamento de gases. Os resultados de cada cenário de modelagem foram comparados com os padrões primários de qualidade do ar da Resolução n. 03/1990, do CONAMA.

A apresentação dos resultados seguirá as seguintes etapas para cada cenário:

- a) Mapa de máximas concentrações das médias de curto prazo (diário para o PTS ou horário para o NO₂);
- b) Tabela dos maiores valores de concentração das médias de curto prazo;
- c) Mapa das violações do padrão de qualidade do ar de curto prazo;
- d) Tabela de ultrapassagens do padrão de qualidade do ar de curto prazo;
- e) Mapa de máximas concentrações da média de longo prazo (anual);
- f) Tabela dos maiores valores de concentração das médias de longo prazo;
- g) Definição dos receptores críticos da média de curto prazo e longo prazo;
- h) Cálculo dos percentis das médias de curto prazo nos receptores críticos (98º percentil para a média diária de PTS e 99,78% para a média horária de NO₂).

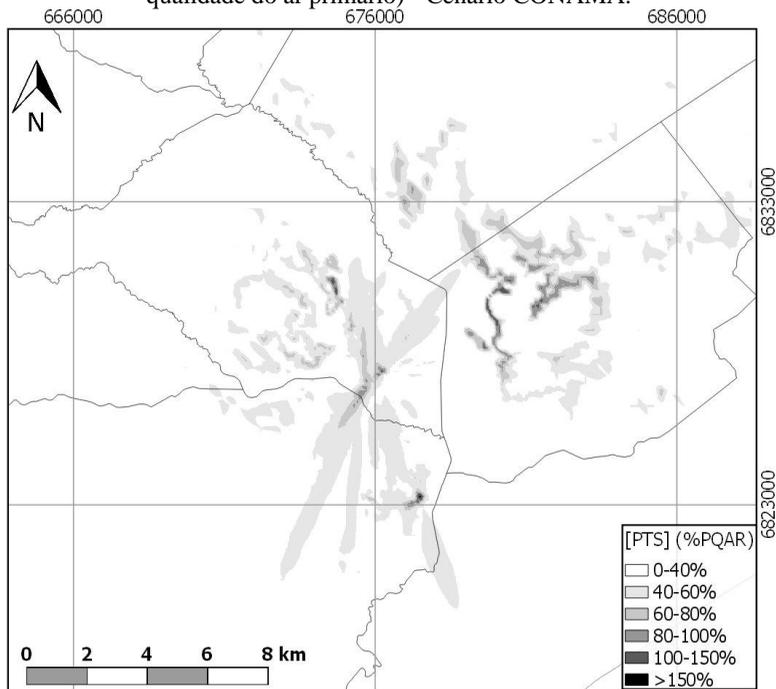
Salienta-se que apenas estão sendo levadas em consideração as emissões das olarias. Caso fossem consideradas emissões veiculares, de outras fontes industriais e da ressuspensão do solo, os cenários apresentados seriam mais críticos em relação a poluição do ar. Todos os mapas apresentados utilizam o *datum* horizontal SIRGAS 2000, projeção Universal Transversa de Mercator (zona 22 J).

4.1. PARTICULADO TOTAL EM SUSPENSÃO (PTS)

4.1.1. Cenário CONAMA

Para o cenário CONAMA foram consideradas as emissões nos limites estabelecidos pela regulamentação brasileira, as Resoluções nº 382/2006 e a nº436/2011. Elas estabelecem o mesmo limite máximo para a concentração de emissão de PTS (730 mg.Nm^{-3}). A seguir, na Figura 15 é apresentado o mapa das maiores concentrações médias de 24 horas encontradas durante os 5 anos de modelagem. Ela apresenta as concentrações resultantes da modelagem como percentual do padrão primário de qualidade do ar. Para o caso do PTS esse valor é de $240 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Figura 15 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

As máximas concentrações ultrapassaram o padrão de qualidade do ar (PQAR) em algumas localidades, na proximidade de Morro da

Fumaça, em Içara e próximo da comunidade de Morro Grande em Sangão. A seguir, a Tabela 11 apresenta a lista dos 20 maiores valores simulados durante os 5 anos de modelagem, para a média diária de PTS. A tabela também apresenta os locais em que essas concentrações ocorreram, bem como a distância e direção em relação a mediana da posição geográfica das olarias.

Tabela 11 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário CONAMA.

[PTS _{24h}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Data	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
410	02/02/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
404	15/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
312	11/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
309	07/12/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
301	03/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
295	04/07/2009	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
294	19/02/2011	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
287	20/02/2011	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
286	14/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
285	01/03/2009	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
274	10/09/2010	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
268	27/06/2012	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
263	18/08/2012	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
260	30/01/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
258	13/01/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
257	16/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
255	06/12/2012	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
255	06/03/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
254	07/10/2009	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
253	13/06/2009	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

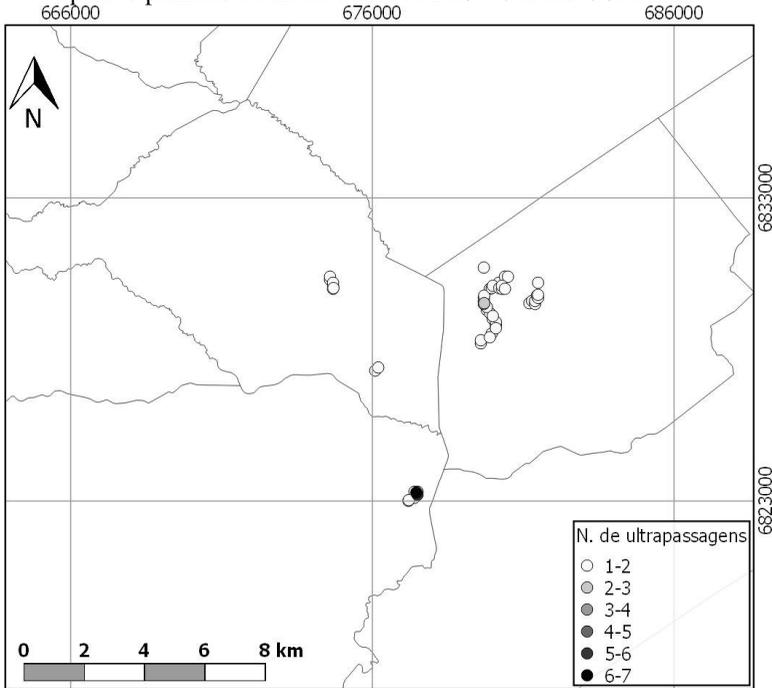
Fonte: Autoria própria.

Apesar do modelo ter sido configurado para registrar os 50 maiores valores, apenas 20 foram gerados. Isso se deve ao fato do AERMOD não registrar eventos repetidos, que ocorrem no mesmo dia. Ou seja, as 50 piores concentrações ocorreram nos 20 dias apresentados. Ressalta-se o fato de todos os vinte valores ultrapassarem o padrão primário de qualidade do ar para o PTS. Além disso, dos 20 eventos mais críticos, 6 deles ocorreram em fevereiro de 2011 indicando que, eventos em dias quentes (de verão, com grande turbulência devido a radiação solar) também causam concentrações críticas. As 20 maiores

concentrações ficaram restritas a 9 receptores, sendo que os mais importantes foram os receptores 1, 2, 3 e 4. A predominância do local onde as maiores concentrações ocorreram foi a sudeste da mediana do posicionamento geográfico das olarias, entre 300 metros e 4,3 quilômetros.

A Figura 16 apresenta a frequência e os receptores em que o padrão de qualidade do ar primário (igual a $240 \mu\text{g.m}^{-3}$) foi superado ao longo dos cinco anos de modelagem.

Figura 16 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

A localização desses receptores também se dá onde ocorreram as maiores concentrações. A ultrapassagem do padrão primário ocorreu em 53 receptores (0,3% do total de receptores) nos 5 anos de modelagem, e totalizando 86 vezes. A Tabela 12 demonstra os 10 receptores em que mais ocorreram as transcendências, bem como a distância e direção em relação a mediana da posição geográfica das olarias.

Tabela 12 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário CONAMA.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
7	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
6	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
3	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
3	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
3	10	6.829.524	679.712	4,29	NE
2	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
2	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
2	12	6.828.300	679.600	3,61	NE
2	13	6.829.600	679.700	4,33	NE
2	14	6.829.700	679.700	4,39	NE

Fonte: Autoria própria.

O receptor onde mais ocorreram ultrapassagens (receptor 1), contabilizou 7 violações no período de 5 anos da modelagem. Esses receptores se situaram entre o nordeste e o sudeste da mediana da localização das olarias, entre 3,5 e 4,5 km. A legislação nacional de qualidade do ar (CONAMA 03/1990) permite a ultrapassagem do padrão diário de PTS até uma vez por ano. Para inferir sobre o número de ultrapassagens em cada ano, a Tabela 13 mostra o número de excedências em cada receptor.

Tabela 13 - Ano e número de violações do PQAR diário em cada receptor - Cenário CONAMA.

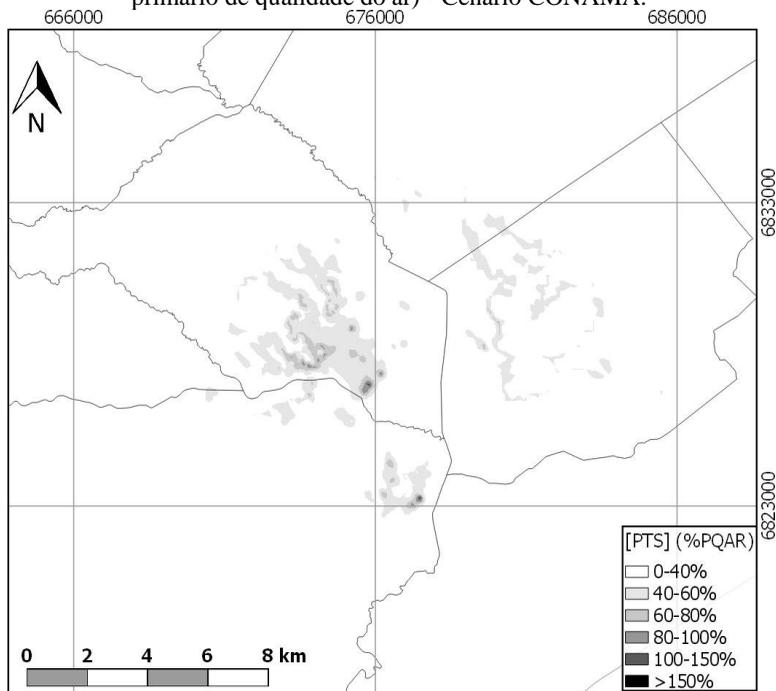
Ano	Receptor	N. de ultrapassagens
2009	4	2
2011	1	4
	2	3
	3	2
	10	2
2012	1	3
	4	4
	12	2

Fonte: Autoria própria.

O critério de apenas uma ultrapassagem por ano da CONAMA 03/1990 não seria respeitado nos receptores 1, 2, 3, 4, 10 e 12.

Na sequência, Figura 17, é apresentada a pluma das máximas concentrações médias anuais para o PTS. Novamente a pluma mostra as concentrações como percentual do padrão primário de qualidade do ar que, nesse caso, é de $80 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Figura 17 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

As maiores concentrações ocorreram em regiões específicas próximas a conjuntos de olarias em Morro da Fumaça e Içara. A Tabela 14 apresenta os receptores nos quais ocorreram as 10 maiores concentrações anuais de PTS, cujo padrão primário para a média anual é $80 \mu\text{g.m}^{-3}$. Na tabela, ainda é apresentada a distância e a direção do receptor em relação a mediana das localizações geográficas das olarias.

Tabela 14 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário CONAMA

[PTS _{24H}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
100	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
90	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
85	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
84	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
80	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
79	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
78	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
76	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
76	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
74	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte: Autoria própria.

Em 4 receptores a concentração média anual excedeu o padrão primário de qualidade do ar, e nos 6 receptores restantes houve um comprometimento de no mínimo 92% do padrão. Para a média anual foram encontrados, em sua maioria, receptores distintos dos verificados na média diária. A localização deles, passou a ser mais próxima (menor que 1 km) da mediana das localizações das olarias, sendo que houve um número expressivo de receptores no quadrante sudoeste.

De posse dos receptores onde ocorreram os eventos críticos da média diária (9 pontos) e da média anual (10 pontos) do PTS ficam caracterizados os receptores críticos. Esses locais foram utilizados na avaliação dos receptores discretos que terão o valor de percentil (98°) de suas concentrações médias diárias verificado. Dos 19 receptores, 4 se repetiram nos eventos críticos diários e anuais, portanto as concentrações foram avaliadas em 15 pontos. A Tabela 15 apresenta o valor do 98° percentil das concentrações diárias para os receptores críticos.

Tabela 15 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário CONAMA.

98º Percentil [PTS _{24H}] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
186	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
168	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
137	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
133	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
132	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
130	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
129	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
120	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
119	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
118	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
116	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
115	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
115	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
112	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
79	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

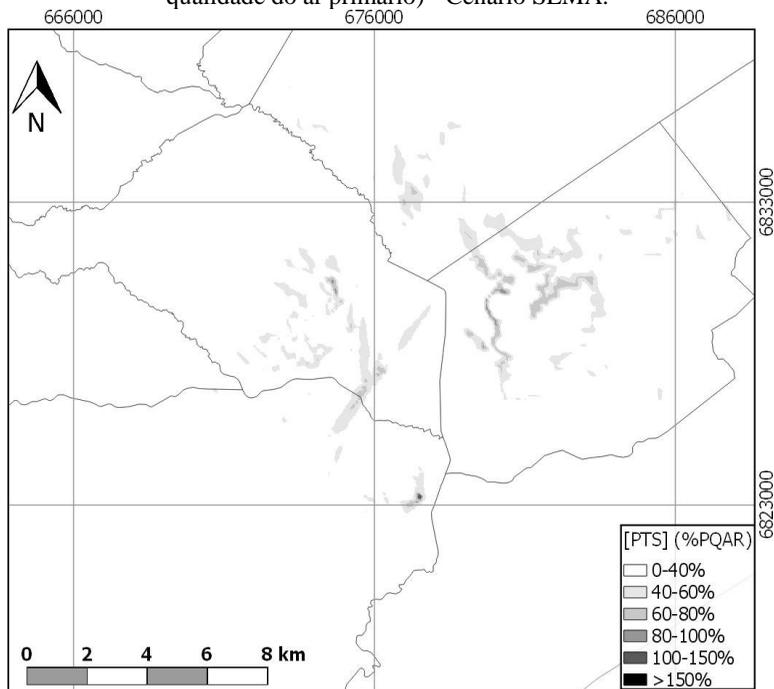
Fonte: Autoria própria.

O 98º percentil atingiu valores de 32,9% a 77,7% do padrão diário de qualidade do ar primário da média de 24 horas para o PTS.

4.1.2. Cenário SEMA

O cenário da SEMA considerou a concentração de emissão no seu limite de 560 mg.Nm⁻³. Além disso, foi considerada uma altura mínima das chaminés de 10 metros (conforme especificado na própria Resolução da SEMA). A Figura 18 apresenta o mapa com as máximas concentrações diárias de PTS para o período de modelagem, em percentual do comprometimento do padrão primário da CONAMA 03/90.

Figura 18 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se a extrapolação do padrão de qualidade do ar diário ($240 \mu\text{g.m}^{-3}$) em apenas uma localidade, na região de Içara. A Tabela 16 apresenta o *ranking* dos maiores valores da concentração diária de PTS encontrada na modelagem para o cenário da SEMA.

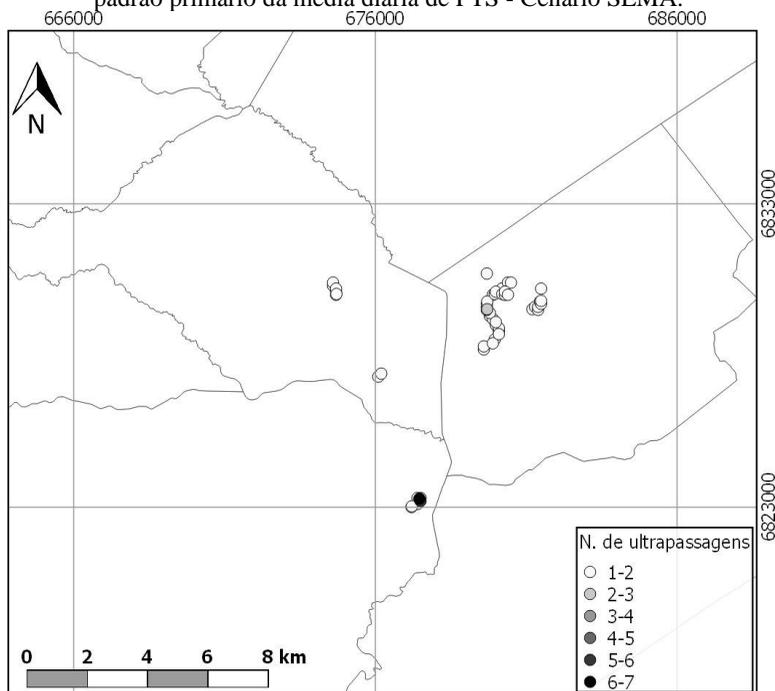
Tabela 16 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário SEMA.

[PTS _{24H}] ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Data	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
315	02/02/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
310	15/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
240	11/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
237	07/12/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
230	03/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
227	04/07/2009	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
226	19/02/2011	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
219	14/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
219	20/02/2011	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
218	01/03/2009	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
210	10/09/2010	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
205	27/06/2012	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
201	18/08/2012	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
200	30/01/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
198	13/01/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
198	16/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
196	06/12/2012	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
195	06/03/2012	2	6.823.200	677.500	4,01	SE
195	07/10/2009	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
194	13/06/2009	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

Fonte: Autoria própria.

Novamente, foram registrados pelo modelo apenas 20 valores, devido a repetição de concentrações em datas iguais. Três dessas concentrações extrapolaram o padrão primário para a média diária de PTS do CONAMA (de 240 $\mu\text{g.m}^{-3}$). As 20 maiores concentrações atingiram valores desde 81% até 131% do referido padrão. As 20 maiores concentrações ocorreram em 9 receptores diferentes (os mesmos verificados no cenário anterior). Onze dessas concentrações ocorreram no verão. Houve uma predominância de locais situados a sudeste e nordeste do centro da área de estudo, com distâncias entre 0,3 e 4,3 km. Na sequência, a Figura 19 mostra a distribuição dos locais em que se excedeu o padrão de qualidade do ar primário do CONAMA para o PTS diário.

Figura 19 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

A localização desses receptores também se dá em locais isolados, 2 em Içara e um na comunidade de Morro Grande em Sangão, onde também ocorreram as maiores concentrações. A ultrapassagem do padrão primário ocorreu em 3 receptores nos 5 anos de modelagem, em igual número de superações. A Tabela 17 demonstra os receptores em que mais ocorreram as transcendências.

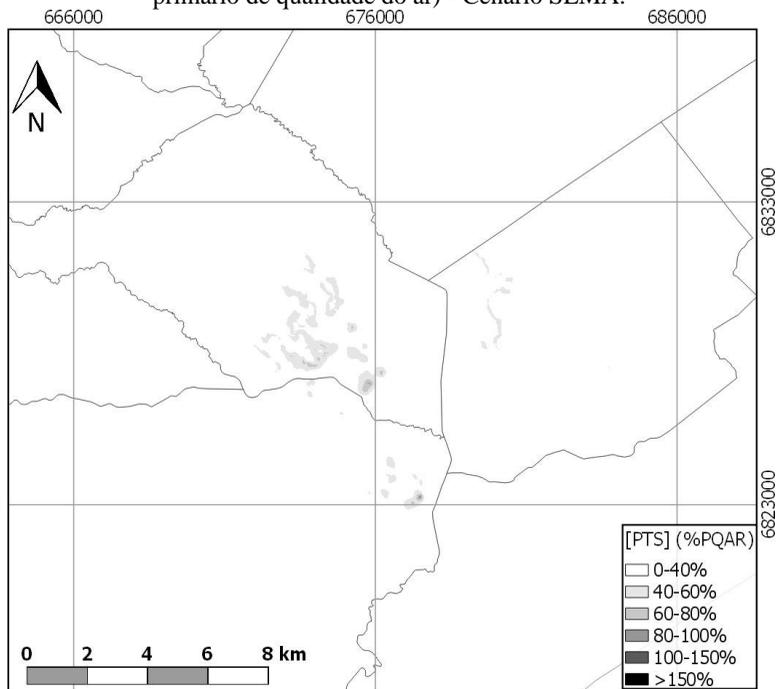
Tabela 17 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário SEMA.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
1	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
1	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
1	3	6.829.500	679.700	4,27	NE

Fonte: Autoria própria.

As médias anuais de PTS geradas por esse cenário são apresentados na Figura 20, em percentual do padrão de qualidade do ar primário anual ($80 \mu\text{g.m}^{-3}$).

Figura 20 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

As maiores concentrações ocorrem em alguns bolsões em Morro da Fumaça e Içara. A Tabela 18 mostra as 10 maiores concentrações médias anuais de PTS para o cenário da SEMA.

Tabela 18 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário SEMA.

[PTS _{ANO}] ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
77	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
69	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
65	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
64	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
61	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
60	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
60	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
58	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
58	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
57	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte: Autoria própria.

As 10 maiores concentrações anuais de PTS para o cenário da SEMA não ultrapassaram o padrão primário de qualidade do ar ($80 \mu\text{g.m}^{-3}$). Comprometeram entre 71% e 96% desse valor. Os receptores foram os mesmos verificados no cenário anterior (CONAMA), situados a uma distância de até 4 km do centro da área de estudo, predominantemente nas direções sudeste e sudoeste.

Para a avaliação dos receptores discretos, foram selecionados os pontos onde ocorreram as maiores médias diárias (9) e as maiores médias anuais (10). Porém, alguns deles se repetiram (seis), resultando em 13 receptores para a avaliação do 98º percentil da concentração média diária de PTS. Tais valores estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário SEMA.

98º Percentil [PTS _{24h}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
143	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
129	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
105	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
100	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
98	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
92	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
90	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
88	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
88	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
88	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
86	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
61	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
17	3	6.829.500	679.700	4,27	NE

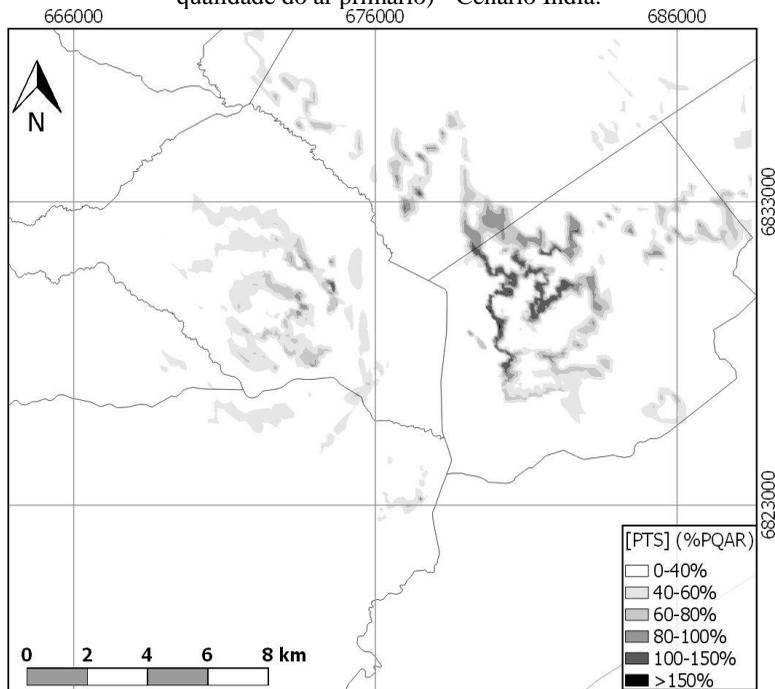
Fonte: Autoria própria.

O 98º percentil nos receptores críticos atingiram valores desde 7% a 59% do padrão de qualidade do ar diário do PTS.

4.1.3. Cenário Índia

Para o cenário que considera o limite de emissão da Índia (de $1000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) também será levada em consideração a sua disposição sobre a altura de chaminé, que será de no mínimo 22 metros. A Figura 21 apresenta a pluma de máximas concentrações diárias encontradas durante o período de modelagem em percentual de comprometimento do padrão primário de qualidade do ar ($240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Figura 21 - Máximas concentrações médias diárias para o PTS (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário Índia.



Fonte:Autoria própria.

Existem pontos de excedência ao norte/nordeste de Morro da Fumaça, sendo que o local onde ocorrem as concentrações mais importantes são a leste, em uma região de relevo acidentado (Morro Grande). A Tabela 20 mostra as maiores concentrações simuladas pelo modelo, no período de modelagem, para esse cenário.

Tabela 20 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário Índia.

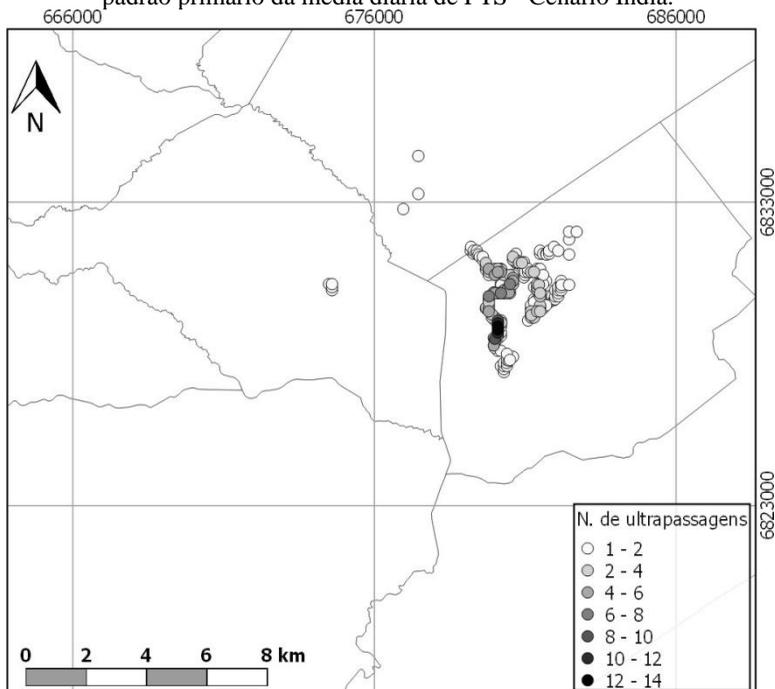
[PTS] _{24h} ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Data	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
397	11/06/2011	21	6.828.900	680.100	4,31	NE
364	04/07/2009	22	6.830.000	680.200	4,97	NE
351	13/06/2009	23	6.828.800	680.100	4,26	NE
330	27/06/2012	24	6.828.500	680.000	4,05	NE
325	16/06/2011	25	6.829.400	679.800	4,30	NE

Fonte:Autoria própria.

O modelo registrou 5 concentrações máximas, pois as outras 45 ocorreram no mesmo dia que estas (o modelo não repete eventos em seu *ranking*). Tal fato indica que são eventos específicos que causam as maiores concentrações. Todas as concentrações aconteceram em meses de inverno. Possivelmente, dias com atmosfera estagnada, ou de formação de inversão térmica persistente. As máximas concentrações ocorrem em locais distantes (maior que 4 km) dos locais onde a emissão é mais intensa (devido a maior altura das chaminés), e acaba causando maiores concentrações onde há uma barreira física (relevo), a nordeste da mediana das emissões. Os maiores valores variaram de 135% a 166% do padrão primário de PTS para a média diária.

A Figura 22 apresenta os locais e frequência em que o padrão primário diário de qualidade do ar, da Resolução CONAMA 03/1990 foi ultrapassado.

Figura 22 - Localização dos receptores e frequência da ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS - Cenário Índia.



Fonte: Autoria própria.

A frequência de ultrapassagem foi de até 14 vezes em um único receptor, e ocorreu em 198 receptores (1,1% do total), totalizando 504 eventos de excedência. A Tabela 21 lista os 10 receptores onde houve o maior número de extrapolações do padrão primário de qualidade do ar ($240 \mu\text{g.m}^{-3}$).

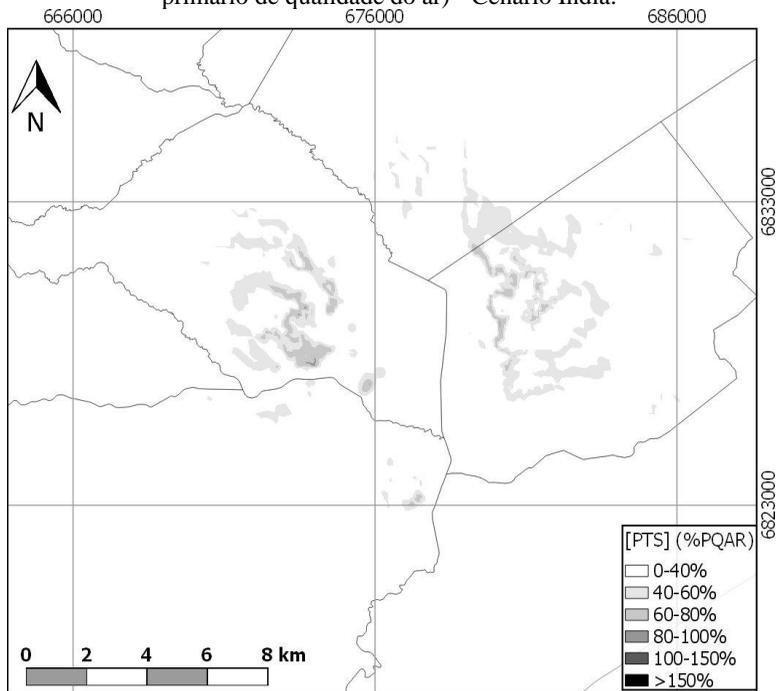
Tabela 21 - Localização e número de ultrapassagens do padrão primário da média diária de PTS - Cenário Índia.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
14	21	6.828.900	680.100	4,31	NE
13	23	6.828.800	680.100	4,26	NE
12	26	6.829.000	680.100	4,35	NE
11	27	6.828.700	680.100	4,22	NE
9	24	6.828.500	680.000	4,05	NE
9	28	6.829.100	680.100	4,40	NE
8	29	6.828.600	680.100	4,18	NE
7	30	6.829.900	679.800	4,59	NE
7	22	6.830.000	680.200	4,97	NE
7	31	6.830.300	680.500	5,39	NE

Fonte: Autoria própria.

O receptor com maior número de extrapolações foi o 21, com 14 ultrapassagens do padrão primário. O cenário de emissões da Índia gerou a pluma das máximas concentrações da média anual de PTS apresentada na Figura 23. A referida figura apresenta a pluma em função do comprometimento do padrão de qualidade do ar primário ($80 \mu\text{g.m}^{-3}$).

Figura 23 - Máximas concentrações médias anuais de PTS (% do padrão primário de qualidade do ar) - Cenário Índia.



Fonte: Autoria própria.

As maiores concentrações médias anuais de PTS ocorreram predominantemente no entorno de Morro da Fumaça e na região de relevo acidentado no limite entre o referido município e Sangão. A Tabela 22 apresenta os locais onde ocorreram as 10 maiores concentrações médias anuais e seus respectivos valores.

Tabela 22 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário Índia.

[PTS _{ANO}] ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Receptores	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
67	32	6.827.700	673.800	2,53	NW
67	33	6.829.524	673.712	3,56	NW
67	34	6.829.500	673.700	3,55	NW
67	35	6.827.700	673.700	2,62	NW
67	36	6.827.800	674.000	2,37	NW
66	21	6.828.900	680.100	4,31	NE
66	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
66	37	6.827.600	673.900	2,41	NW
66	38	6.827.700	674.000	2,34	NW
66	39	6.829.274	673.462	3,58	NW

Fonte: A autoria própria.

Os dez maiores valores não ultrapassaram o padrão primário ($80 \mu\text{g.m}^{-3}$), comprometendo entre 82% e 84% desse valor. Os receptores aqui encontrados são distintos dos encontrados no cenário do CONAMA e da SEMA para o mesmo caso (com exceção do receptor 15). Eles se situaram predominantemente a noroeste do centro da área de estudo, contrastando com a predominância da direção sudoeste/sudeste dos cenários do CONAMA e da SEMA. De posse dos receptores críticos para a média diária (5) e anual (10) foi feita a avaliação do 98º percentil da média diária de PTS. Um desses receptores se repetiu, totalizando 14 pontos avaliados. Todos os receptores, com exceção do n. 15, foram inéditos quando comparada a mesma avaliação do cenário do CONAMA e da SEMA. Tal fato ocorreu devido a alteração da altura das chaminés terem deslocado os receptores críticos. Os valores do 98º percentil estão na Tabela 23.

Tabela 23 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário Índia.

98º Percentil [PTS _{24H}] (µg.m ⁻³)	Receptores	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
176	21	6.828.900	680.100	4,31	NE
170	23	6.828.800	680.100	4,26	NE
161	25	6.829.400	679.800	4,30	NE
161	22	6.830.000	680.200	4,97	NE
154	24	6.828.500	680.000	4,05	NE
119	34	6.829.500	673.700	3,55	NW
117	33	6.829.524	673.712	3,56	NW
117	39	6.829.274	673.462	3,58	NW
115	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
105	36	6.827.800	674.000	2,37	NW
104	32	6.827.700	673.800	2,53	NW
102	38	6.827.700	674.000	2,34	NW
98	35	6.827.700	673.700	2,62	NW
96	37	6.827.600	673.900	2,41	NW

Fonte: Autoria própria.

O comprometimento do padrão de qualidade do ar diário de PTS do percentil avaliado compreendeu valores de 40% a 73%.

4.1.4. Cenário Estados Unidos

Nesse cenário, foi considerada a concentração de emissão para todas as fontes igual ao limite de emissão a ser implantado nos Estados Unidos (de 92 mg.m⁻³). Não será apresentada a pluma de máximas concentrações, pois o comprometimento de qualidade do ar ficou usualmente abaixo de 20% do padrão de qualidade do ar brasileiro, para todo o domínio de modelagem. A Tabela 24 apresenta as máximas concentrações simuladas. Como comparação, o padrão primário de qualidade do ar diário para o PTS é de 240 µg.m⁻³.

Tabela 24 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário Estados Unidos.

[PTS _{24h}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Data	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
52	02/02/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
51	15/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
39	11/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
39	07/12/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
38	03/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
37	04/07/2009	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
37	19/02/2011	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
36	20/02/2011	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
36	14/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
36	01/03/2009	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
35	10/09/2010	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
34	27/06/2012	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
33	18/08/2012	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
33	30/01/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
32	13/01/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
32	16/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
32	06/12/2012	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
32	06/03/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
32	07/10/2012	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
32	13/06/2009	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

Fonte: Autoria própria.

As 50 maiores concentrações ocorreram em 20 eventos (dias). As maiores concentrações compreenderam valores entre 13% e 21% do padrão de qualidade do ar diário para o PTS. Essas concentrações ocorreram em 9 receptores distintos. Foram os mesmos locais averiguados no cenário diário de PTS do CONAMA. Isso se deve ao fato da altura de chaminé não ter se alterado, sendo que as concentrações ambientais ocorrem nos mesmos locais, sendo proporcionais às taxas de emissão. Não houve extrapolação do padrão, portanto não serão apresentados o gráfico e a tabela de frequência de violações para esse cenário.

As concentrações das médias anuais de PTS também comprometeram menos de 20% do padrão de qualidade do ar. A Tabela 25 apresenta os valores das máximas médias anuais de PTS para o cenário das emissões dos Estados Unidos.

Tabela 25 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário Estados Unidos.

[PTS_{ANO}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Receptor	Long. (UTM, m)	Lat. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
13	1	677.462	6.823.274	3,93	SE
11	15	675.800	6.827.000	0,43	SW
11	2	677.500	6.823.300	3,92	SE
11	16	675.712	6.827.024	0,52	NW
10	17	677.400	6.823.200	3,98	SE
10	18	675.700	6.827.000	0,53	SW
10	19	675.700	6.826.900	0,54	SW
10	4	677.500	6.823.200	4,01	SE
10	20	675.600	6.826.800	0,67	SW
9	9	677.400	6.823.300	3,89	SE

Fonte:Autoria própria.

Os dez maiores valores da média anual de PTS atingiram valores entre 12% e 16% do padrão de qualidade do ar anual ($80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Para o caso anual também verificou-se a repetição dos mesmos receptores que o cenário CONAMA. Com os receptores das maiores médias anuais (10) e aos receptores das maiores médias diárias (9) foram definidos os pontos críticos para a avaliação do 98º percentil. Quatro desses receptores se repetiram, portanto foram avaliados 15 pontos. Os valores do 98º percentil da concentração média diária de PTS para os quinze receptores críticos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário Estados Unidos.

98º Percentil [PTS _{24H}] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
24	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
21	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
17	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
17	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
17	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
16	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
16	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
15	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
15	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
15	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
15	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
15	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
14	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
14	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
10	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

Fonte: Autoria própria.

Os receptores críticos foram os mesmos do cenário do CONAMA, devido ao fato das alturas de chaminés serem as mesmas. O 98º percentil das concentrações médias diárias nos receptores avaliados atingiu valores desde 4% a 10% do PQAR primário.

4.1.5. Cenário União Europeia

Para a simulação do cenário da União Europeia foi empregado o limite de emissão de 50 mg.Nm⁻³. A pluma de máximas concentrações não será apresentada pelo fato das concentrações terem ficado abaixo de 20% do padrão brasileiro de qualidade do ar primário. A Tabela 27 apresenta as 20 máximas concentrações da média diária de PTS simuladas para os 5 anos de modelagem.

Tabela 27 - Lista dos maiores valores da concentração média diária de PTS obtidas durante a modelagem - Cenário União Europeia.

[PTS _{24H}] ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Data	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
28	02/02/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
28	15/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
21	11/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
21	07/12/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
21	03/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
20	19/02/2011	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
20	04/07/2009	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
19	14/02/2011	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
19	20/02/2011	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
19	01/03/2009	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
19	10/09/2010	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
18	27/06/2012	7	6.828.200	679.600	3,57	NE
18	30/01/2011	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
18	18/08/2012	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
18	13/01/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
17	16/06/2011	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
17	06/12/2012	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
17	06/03/2012	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
17	07/10/2012	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
17	13/06/2009	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

Fonte: Autoria própria.

Em apenas 20 dias ocorreram as 50 maiores concentrações. O padrão diário de PTS ($240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) foi comprometido entre 7% e 12%. Assim como no caso do Estados Unidos, os mesmos receptores se repetiram, pela manutenção das condições de emissão.

As concentrações das médias anuais de PTS também comprometeram menos de 20% do padrão de qualidade do ar. Os valores máximos para as concentrações ambientais médias anuais, causadas pelas emissões no limite da legislação europeia, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Lista das dez maiores concentrações anuais de PTS e seus respectivos receptores - Cenário União Europeia.

[PTS _{ANO}] ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
7	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
6	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
6	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
6	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
6	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
5	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
5	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
5	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
5	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
5	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte: A autoria própria.

Tal qual o caso dos Estados Unidos, os receptores das maiores concentrações anuais foram os mesmos do cenário do CONAMA. Considerando o padrão de qualidade do ar anual do PTS igual a $80 \mu\text{g.m}^{-3}$, os valores máximos encontrados na modelagem atingiram valores entre 6 e 9% desse padrão. Levando em conta os receptores das máximas anuais (10) e os das máximas diárias (10), e removendo os repetidos (5), foram definidos os 15 receptores críticos que terão seu 98º percentil da concentração média diária avaliados (Tabela 29).

Tabela 29 - 98º Percentil das concentrações diárias de PTS nos receptores críticos - Cenário União Europeia.

98º Percentil [PTS _{24H}] (µg.m ⁻³)	Receptor	Latitude (UTM, m)	Longitude (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
13	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
12	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
9	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
9	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
9	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
9	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
9	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
8	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
8	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
8	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
8	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
8	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
8	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
8	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
5	7	6.828.200	679.600	3,57	NE

Fonte: Autoria própria.

Nesses receptores o 98º percentil comprometeu desde 2% até 5% do padrão de qualidade do ar médio de 24 horas.

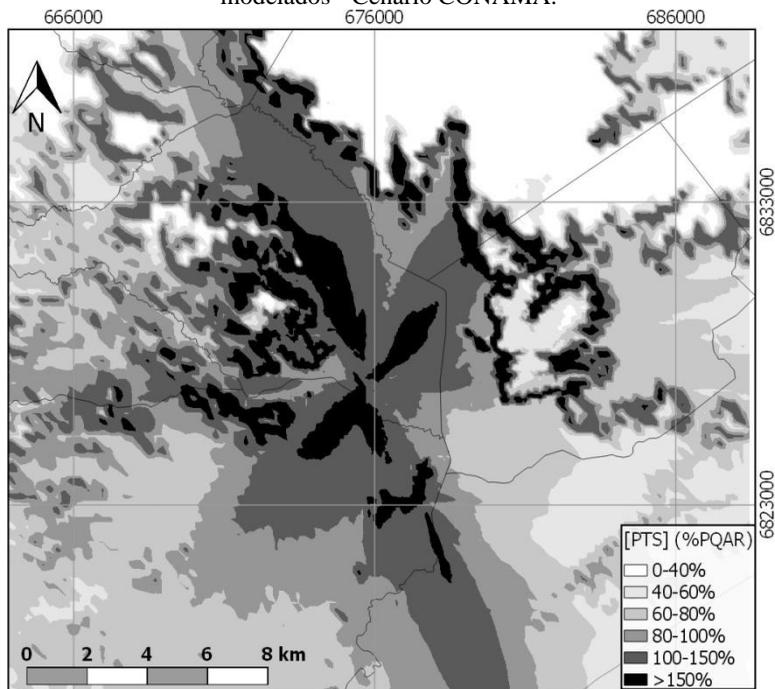
4.2. DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO₂)

As concentrações de emissão de NO_x foram, por simplificação e conservadorismo, plenamente convertidas em NO₂.

4.2.1. Cenário CONAMA

Para o cenário CONAMA será considerado o limite de emissão de NO_x de 650 mg.Nm⁻³. A pluma apresentando as maiores concentrações médias horárias de NO₂, obtidas nos 5 anos modelados, é apresentada na Figura 24. Como nas plumas já apresentadas, a escala é referente ao comprometimento do padrão primário de qualidade do ar (que para o dióxido de nitrogênio horário é 320 µg.m⁻³).

Figura 24 - Máximas concentrações da média horária de NO_2 para os 5 anos modelados - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

As máximas concentrações de NO_2 causadas pelas emissões nas condições limite das resoluções do CONAMA extrapolaram os padrões de qualidade do ar em uma área significativa. Praticamente todo o município de Morro da Fumaça seria englobado pela área em que o padrão foi desrespeitado. O *ranking* contendo os 24 maiores valores da concentração média horária de NO_2 da simulação está elencado na Tabela 30.

Tabela 30 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO₂ encontradas durante a modelagem - Cenário CONAMA.

[NO _{2,1H}] (µg.m ⁻³)	Data/hora	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
1.888	09/03/2011 24h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
1.830	14/10/2009 20h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
1.820	05/03/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.786	26/03/2013 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.752	13/03/2013 01h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.746	11/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.737	08/11/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.734	09/04/2009 21h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
1.731	18/04/2012 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.724	29/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.711	28/11/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.690	09/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.688	10/04/2009 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.685	26/04/2010 20h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.678	04/08/2012 19h	41	6.830.200	674.700	3,54	NW
1.671	12/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.666	05/11/2009 06h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.655	05/06/2009 19h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.644	08/11/2011 22h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
1.641	02/03/2009 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.637	16/10/2013 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.624	20/02/2011 20h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
1.623	05/12/2011 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.613	13/12/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW

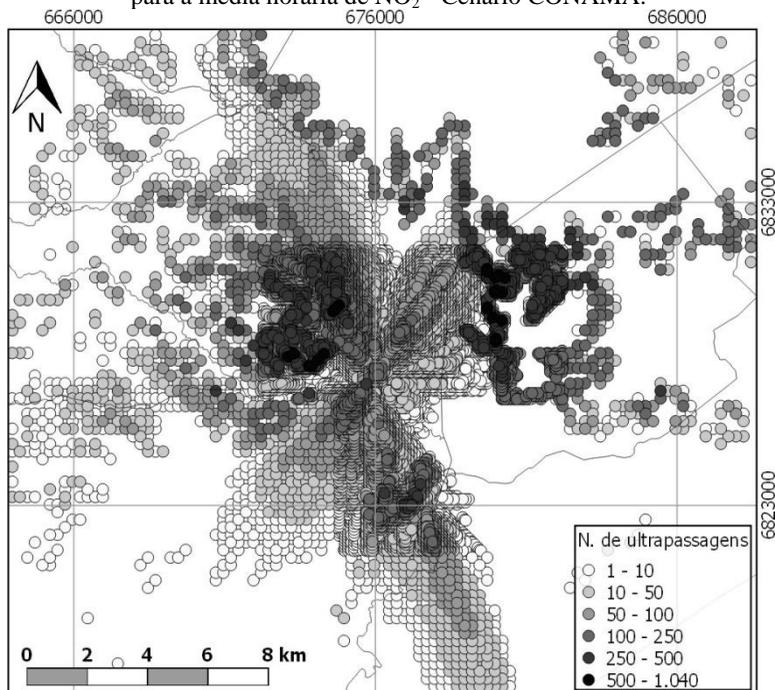
Fonte:Autoria própria.

Foram gerados 24 resultados do *ranking* (relação dos maiores valores), mesmo com a configuração do modelo ter sido para 50. Isso ocorreu porque para esse arquivo o AERMOD registra apenas um resultado por hora, e por receptor. As 24 maiores concentrações ocorreram em 4 receptores distintos, sempre no período noturno. Dois desses receptores são inéditos na avaliação (40 e 41), ambos situados a noroeste do centro da área de estudo e a uma distância maior que 3 km. Tal fato deve-se provavelmente a estabilidade atmosférica que ocorre durante a noite (formação de inversão térmica). O comprometimento do padrão primário da qualidade do ar, nesta tabela, foi desde 504% (1.613 µg.m⁻³) até 590% (1.888 µg.m⁻³). As concentrações ultrapassariam o

nível de atenção da Resolução CONAMA 03/1990 (que é igual a $1.130 \mu\text{g.m}^{-3}$) e se aproximam do nível de alerta ($2.260 \mu\text{g.m}^{-3}$).

A Figura 25 ilustra espacialmente os locais e a frequência em que as excedências do padrão primário de qualidade do ar horário ocorreram.

Figura 25 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO_2 - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

A ultrapassagem da qualidade do ar ocorreu em 8.708 receptores (praticamente 50% do total de receptores usados na modelagem), totalizando 671.972 extrapolações. Os 10 receptores onde mais ocorreram ultrapassagens do padrão secundário estão listados na Tabela 31.

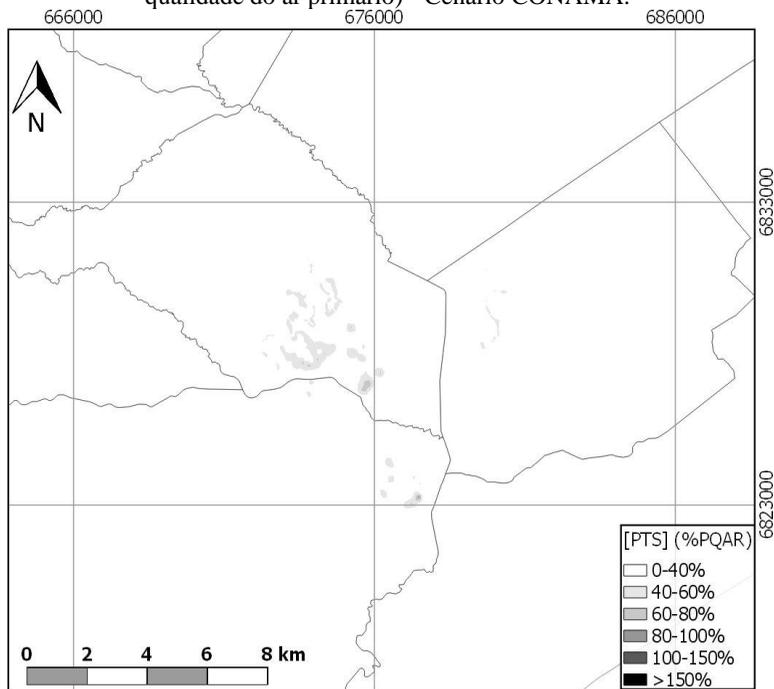
Tabela 31 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO₂ - Cenário CONAMA.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
1.040	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
838	42	6.827.400	676.200	0,39	NW
796	26	6.829.000	680.100	4,35	NE
784	28	6.829.100	680.100	4,40	NE
757	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
752	43	6.827.700	673.600	2,72	NW
732	35	6.827.700	673.700	2,62	NW
718	44	6.827.800	673.600	2,75	NW
682	21	6.828.900	680.100	4,31	NE
655	45	6.827.900	673.200	3,16	NW

Fonte: Autoria própria.

O receptor onde houve maior número de violações foi o de n. 4. O ineditismo de alguns receptores, quando comparados à média diária de PTS, deve-se ao tempo de média distinto (horas em vez de dias). A Figura 26 apresenta a pluma das máximas concentrações médias anuais para o NO₂ para o período modelado (em percentual do padrão de qualidade do ar primário, que é de 100 µg.m⁻³).

Figura 26 - Concentrações médias anuais para o NO_2 (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário CONAMA.



Fonte: Autoria própria.

Há alguns locais onde a concentração média anual é maior: nas proximidades de Morro da Fumaça e de Içara. Para esmiúçar os maiores valores encontrados, a Tabela 32 demonstra os 10 maiores valores para a média anual de NO_2 e os receptores onde elas ocorreram.

Tabela 32 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO₂ - Cenário CONAMA.

[NO ₂ -ANO] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
89	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
80	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
76	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
75	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
71	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
71	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
70	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
68	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
68	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
66	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte: Autoria própria.

Os 10 maiores valores encontrados atingiram valores de 66% a 89% do padrão de qualidade do ar primário anual (100 µg.m⁻³). Os receptores onde ocorreram as maiores concentrações anuais de NO₂ foram os mesmos onde ocorreram as maiores concentrações anuais de PTS.

Com a definição dos receptores críticos para a concentração média horária (4 receptores) e da média anual (10 receptores) foi feita uma avaliação do percentil das concentrações horárias de NO₂ neles. A Tabela 33 sumariza o valor do 99,78º percentil para o NO₂ horário nos 14 receptores críticos.

Tabela 33 - 99,78° Percentil das concentrações horárias de NO₂ nos receptores críticos - Cenário CONAMA.

98° Percentil [NO _{2-1H}] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
256,0	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
250,3	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
237,4	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
223,7	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
206,1	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
184,6	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
177,3	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
163,2	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
162,9	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
161,6	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
153,7	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
152,7	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
144,2	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
138,6	41	6.830.200	674.700	3,54	NW

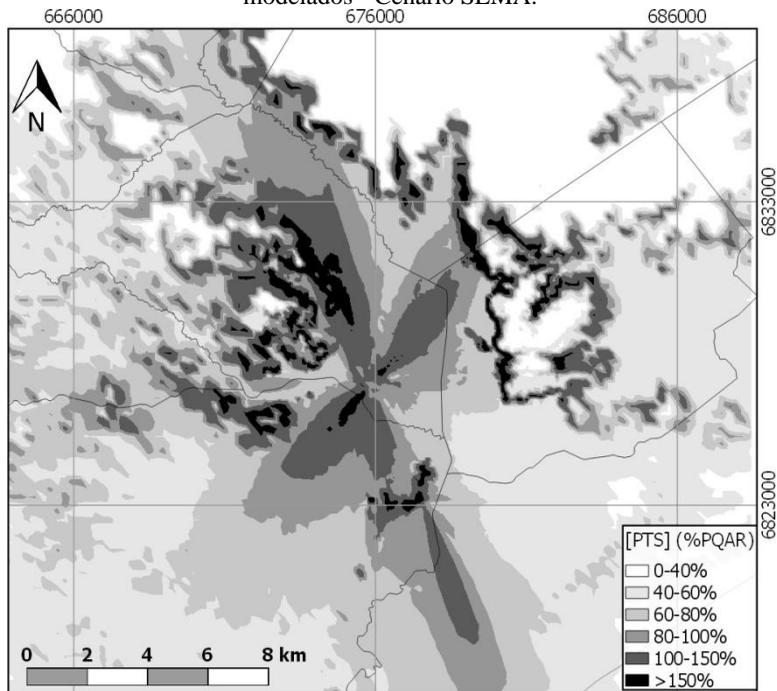
Fonte: Autoria própria.

Mesmo excluindo os *outliers* causados pela superestimação do modelo, os valores do 99,78° percentil ficaram entre 139 µg.m⁻³ (43% do PQAR primário) e 256 µg.m⁻³ (80% do PQAR primário), ou seja, comprometimento significativo do padrão horário, de 320 µg.m⁻³.

4.2.2. Cenário SEMA

O cenário SEMA considerou o limite de emissão de NO_x de 500 mg.m⁻³ e a altura de chaminé mínima de 10 metros. As máximas concentrações horárias simuladas pelo modelo estão ilustradas na pluma da Figura 27, em relação ao padrão primário de qualidade do ar (que é de 320 µg.m⁻³).

Figura 27 - Máximas concentrações da média horária de NO_2 para os 5 anos modelados - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

O padrão de qualidade do ar primário foi violado no entorno de Morro da Fumaça, em Içara e na região limítrofe entre Morro da Fumaça e Sangão. A relação dos maiores valores simulados na modelagem é detalhada na Tabela 34.

Tabela 34 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO₂ encontradas durante a modelagem - Cenário SEMA.

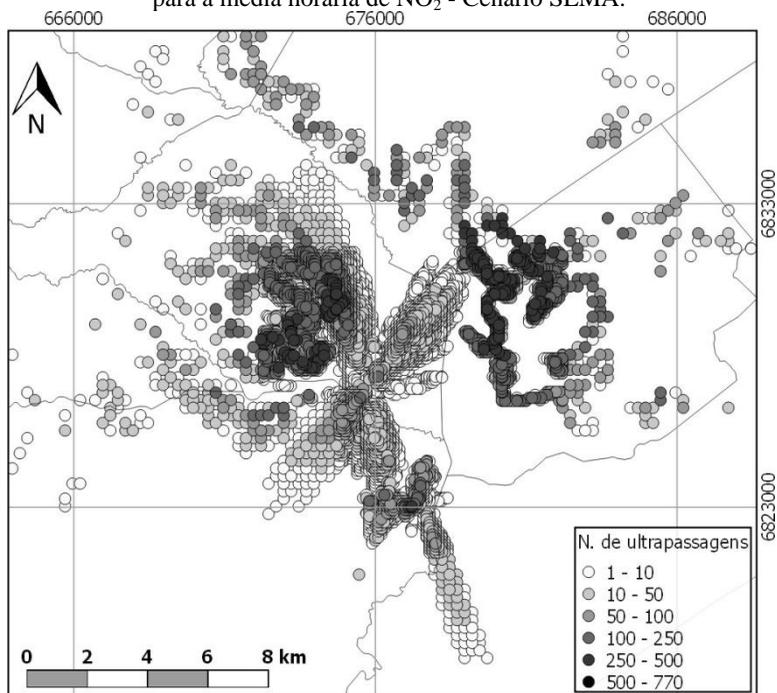
[NO ₂ -1H] (µg.m ⁻³)	Data/hora	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
1.457	09/03/2011 24h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
1.410	05/03/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.404	14/10/2009 20h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
1.383	26/03/2013 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.358	13/03/2013 01h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.352	11/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.350	09/04/2009 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.349	18/04/2012 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.342	14/05/2013 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.336	29/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.316	28/11/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.308	09/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.304	26/04/2010 20h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.304	10/04/2009 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.288	05/11/2009 06h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.285	12/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.280	04/08/2012 19h	41	6.830.200	674.700	3,54	NW
1.276	05/06/2009 19h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.263	08/11/2011 22h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
1.262	02/03/2009 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.257	16/01/2013 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.247	05/12/2011 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
1.247	20/02/2011 20h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW

Fonte: Autoria própria.

Os 50 maiores valores de concentração ocorreram em 23 eventos (horas) críticas, mesmo com a configuração do modelo ter sido para 50. Esses eventos ocorreram em 4 pontos (receptores), os mesmos do cenário CONAMA do NO₂. Novamente, as concentrações ocorreram no período noturno, apesar da mudança da taxa e altura de emissão. As concentrações máximas atingiram valores desde 390% até 455% do padrão primário de qualidade do ar horário do NO₂ (320 µg.m³). Assim como no cenário anterior, o nível de atenção da Resolução CONAMA 03/1990 (que é igual a 1.130 µg.m³) foi ultrapassado.

A Figura 28 ilustra especialmente os locais e a frequência em que as excedências do padrão primário de qualidade do ar horário ocorreram.

Figura 28 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO_2 - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

O número de receptores nos quais o padrão primário foi superado é de 4.564 (26% do total). Se somadas, as extrapolações totalizam 269.220 vezes nos 5 anos modelados. Os 10 receptores onde mais ocorreram ultrapassagens do padrão primário estão listados na Tabela 35.

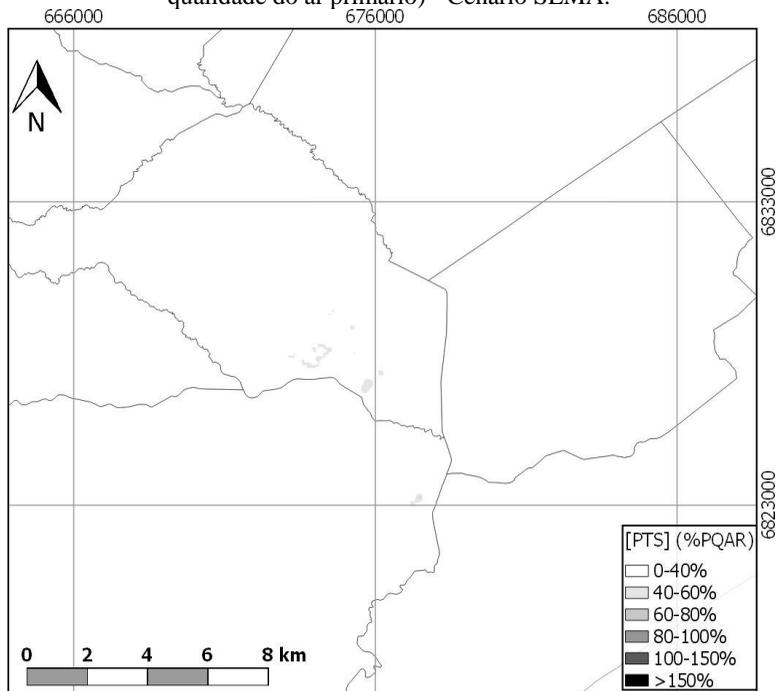
Tabela 35 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO₂ - Cenário SEMA.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Long. (UTM, m)	Lat. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
769	4	677.500	6.823.200	4,01	SE
678	42	676.200	6.827.400	0,39	NW
479	26	680.100	6.829.000	4,35	NE
468	21	680.100	6.828.900	4,31	NE
448	46	679.700	6.830.700	5,07	NE
433	47	679.700	6.830.800	5,14	NE
428	48	679.712	6.830.774	5,13	NE
425	49	673.300	6.828.000	3,10	NW
425	50	679.600	6.831.000	5,22	NE
415	29	680.100	6.828.600	4,18	NE

Fonte: Autoria própria.

O receptor com o maior número de ultrapassagens foi o n.4, assim como no cenário do CONAMA. Porém houve a alteração de alguns pontos, devido ao deslocamento das plumas, ocasionado pela alteração da altura mínima de chaminé nesse cenário. O máximo impacto das emissões do cenário da SEMA nas concentrações médias anuais de NO₂ é apresentado na Figura 29. A pluma é apresentada em função do padrão primário de qualidade do ar (100 µg.m⁻³).

Figura 29 - Concentrações médias anuais para o NO_2 (% do padrão de qualidade do ar primário) - Cenário SEMA.



Fonte: Autoria própria.

Em alguns pequenos bolsões observam-se concentrações de até 60% do padrão de qualidade do ar primário. Os 10 maiores valores simulados para a média anual do NO_2 estão dispostos na Tabela 36.

Tabela 36 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO₂ - Cenário SEMA.

[NO ₂ -ANO] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
69	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
61	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
58	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
57	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
55	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
54	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
53	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
52	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
52	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
51	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte: Autoria própria.

O comprometimento do padrão primário anual para os 10 maiores valores ficou entre 51% e 69%. Os receptores nos quais essas concentrações ocorreram foram os mesmos do cenário do CONAMA. A distância do centro do domínio de modelagem foi entre 0,4 e 4 km.

Com os receptores em que ocorreram as máximas concentrações horárias (4) e as máximas concentrações anuais (10) ficam definidos os receptores onde será avaliado 99,78º percentil das concentrações horárias de NO₂. Tais valores estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - 99,78° Percentil das concentrações horárias de NO₂ nos receptores críticos - Cenário SEMA.

98° Percentil [NO₂-1H] (µg.m⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
197	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
192	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
182	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
172	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
158	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
141	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
135	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
125	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
125	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
124	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
118	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
116	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
110	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
104	41	6.830.200	674.700	3,54	NW

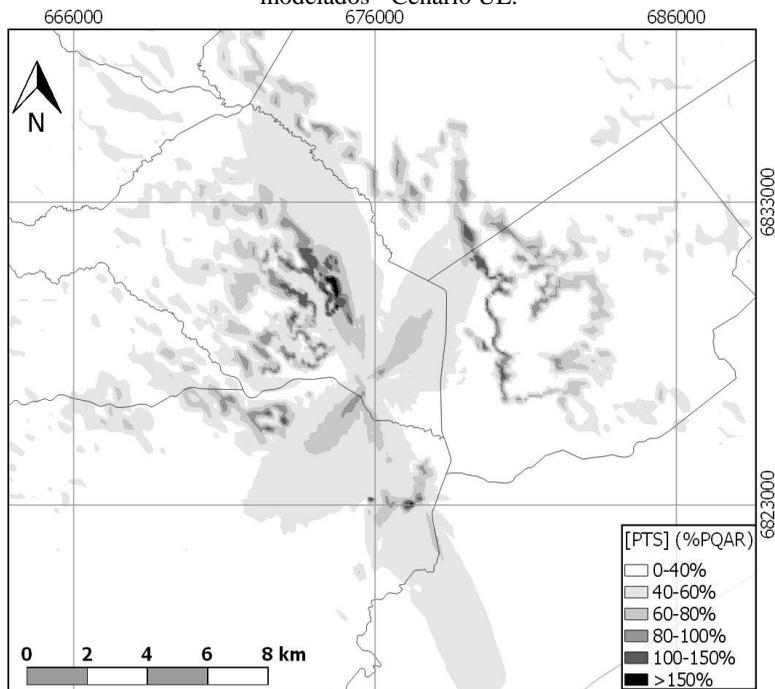
Fonte: Autoria própria.

Os valores do 99,78° percentil do padrão horário de NO₂ nos receptores críticos atingiram desde 33% a 61% de comprometimento padrão primário de qualidade do ar horário para o NO₂.

4.2.3. Cenário União Europeia

A concentração de emissão desse cenário foi igual a 250 mg.m⁻³. A Figura 30 ilustra as máximas concentrações horárias de NO₂, em percentual do padrão primário de qualidade do ar (cujo valor é 320 µg.m⁻³).

Figura 30 - Máximas concentrações da média horária de NO_2 para os 5 anos modelados - Cenário UE.



Fonte: Autoria própria.

Apesar da restrição de emissão ser maior, ainda há ultrapassagens do padrão de qualidade do ar. O rol das 24 maiores concentrações médias horárias de NO_2 da simulação está elencado na Tabela 38.

Tabela 38 - Lista dos maiores valores de concentrações médias horárias de NO₂ encontradas durante a modelagem - Cenário UE.

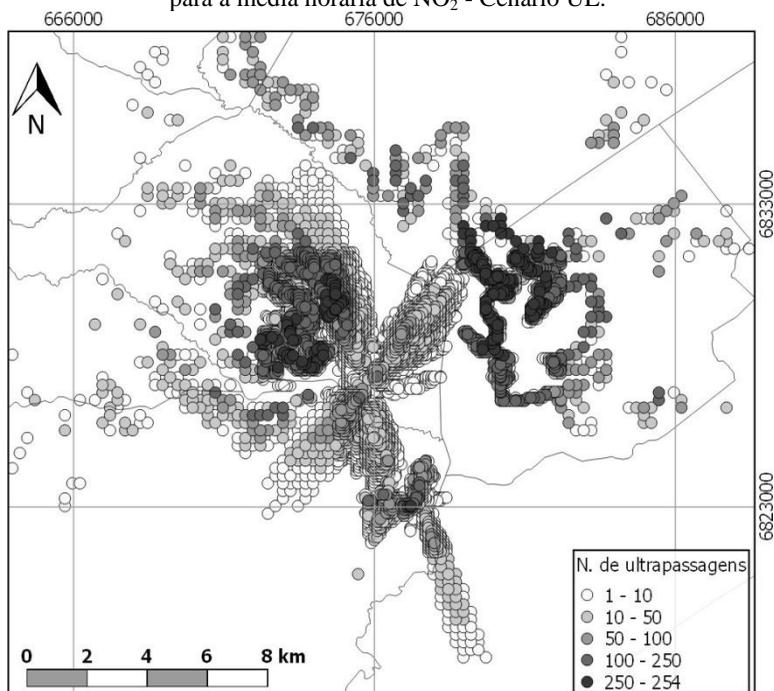
[NO _{2-1H}] (µg.m ⁻³)	Data/hora	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
724	09/03/2011 24h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
702	14/10/2009 20h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
697	05/03/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
684	26/03/2013 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
671	13/03/2013 01h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
669	11/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
665	09/04/2009 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
664	18/04/2012 21h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
663	14/05/2013 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
661	29/04/2011 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
656	28/11/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
647	09/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
647	10/04/2009 21h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
645	26/04/2010 20h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
643	04/08/2012 19h	41	6.830.200	674.700	3,54	NW
640	12/10/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
639	05/11/2009 06h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
634	05/06/2009 19h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
631	08/11/2011 22h	11	6.823.024	677.212	4,10	SE
629	02/03/2009 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
627	16/10/2013 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
623	20/02/2011 20h	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
622	05/12/2011 23h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
618	13/12/2012 22h	40	6.830.000	674.700	3,36	NW

Fonte: Autoria própria.

As 24 maiores concentrações ocorreram em 4 receptores, os mesmos do cenário CONAMA e SEMA, para as concentrações médias horárias de NO₂. O comprometimento do padrão primário da qualidade do ar foi desde 193% até 226%.

A Figura 31 ilustra os locais e a frequência em que as violações do padrão primário de qualidade do ar horário ocorreram.

Figura 31 - Frequência de ultrapassagem do padrão de qualidade do ar primário para a média horária de NO_2 - Cenário UE.



Fonte: Autoria própria.

As ultrapassagens da qualidade do ar ocorreram em 345 receptores (praticamente 2% dos receptores avaliados), em um total de 9.797 excedências. Os 10 receptores onde a violação do padrão primário de qualidade do ar foi mais frequente estão listados na Tabela 39.

Tabela 39 - Relação dos 10 receptores onde houve maior ultrapassagem do PQAR primário para a média horária de NO₂ - Cenário UE.

Nº de ultrapassagens	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
254	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
150	51	6.829.400	674.600	2,90	NW
136	52	6.829.600	674.700	3,01	NW
131	40	6.830.000	674.700	3,36	NW
128	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
122	53	6.830.100	674.700	3,45	NW
117	54	6.830.300	674.600	3,67	NW
114	55	6.830.400	674.600	3,76	NW
111	56	6.830.000	674.400	3,51	NW
111	57	6.829.524	674.712	2,94	NW

Fonte:Autoria própria.

O comprometimento do padrão de qualidade do ar anual de NO₂ para o cenário da UE ficou abaixo de 40% do PQAR, portanto não será apresentado o mapa. Um detalhamento dos maiores valores encontrados para a média anual é apresentado na Tabela 40 (o padrão de qualidade do ar primário é igual a 100 µg.m⁻³).

Tabela 40 - Relação dos 10 maiores valores da concentração média anual de NO₂ - Cenário UE.

[NO ₂ -ANO] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
34	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
31	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
29	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
29	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
27	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
27	18	6.827.000	675.700	0,53	SW
27	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
26	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
26	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
25	9	6.823.300	677.400	3,89	SE

Fonte:Autoria própria.

Os 10 maiores valores, encontrados oscilaram entre 25% a 34% do padrão de qualidade do ar anual (cujo valor é 100 µg.m⁻³).

De posse dos receptores das máximas concentrações horárias (4) e da média anual (10) foi feita a avaliação do percentil das

concentrações horárias de NO₂ neles. A Tabela 41 sumariza o valor do 99,78º percentil da concentração média horária para o NO₂ nos 14 receptores críticos.

Tabela 41 - 99,78º Percentil das concentrações horárias de NO₂ nos receptores críticos - Cenário UE.

98º Percentil [NO _{2-1H}] (µg.m ⁻³)	Receptor	Lat. (UTM, m)	Long. (UTM, m)	Dist. (km)	Dir.
17	4	6.823.200	677.500	4,01	SE
17	1	6.823.274	677.462	3,93	SE
15	2	6.823.300	677.500	3,92	SE
15	3	6.829.500	679.700	4,27	NE
14	17	6.823.200	677.400	3,98	SE
13	8	6.827.300	676.100	0,32	NW
13	6	6.823.100	677.400	4,08	SE
12	5	6.830.024	674.712	3,38	NW
11	9	6.823.300	677.400	3,89	SE
11	20	6.826.800	675.600	0,67	SW
11	19	6.826.900	675.700	0,54	SW
10	15	6.827.000	675.800	0,43	SW
10	16	6.827.024	675.712	0,52	NW
10	18	6.827.000	675.700	0,53	SW

Fonte: A autoria própria.

Os valores do 99,78º percentil oscilaram entre 3% e 5% do padrão horário de qualidade do ar.

4.3. SUMÁRIO DOS RESULTADOS

4.3.1. Particulado Total em Suspensão

Para facilitar a comparação entre os cenários de emissão, a Tabela 42 demonstra os dados de entrada que fazem com que cada cenário seja distinto: concentração de emissão e altura das chaminés (mínima e média).

Tabela 42 - Diferença entre os cenários de emissão do MP.

	Concentração de emissão PTS (mg.Nm⁻³)	Altura mínima chaminé (m)	Altura média chaminé (m)
CONAMA	730	-	12,4
SEMA	560	10	12,7
ÍNDIA	1.000	22	22,2
EUA	92	-	12,4
UE	50	-	12,4

Fonte:Autoria própria.

Para o cenário SEMA a emissão é 23% inferior ao limite do CONAMA e a altura de emissão foi 30 cm maior (em média). Para o cenário da Índia a emissão foi 37% superior ao limite brasileiro e a altura média de emissão foi 9,8 m superior a média existente. Para os cenários dos Estados Unidos e União Europeia, houve apenas um decréscimo da emissão, de 87% e 93% respectivamente, sem alteração na altura das chaminés. A Tabela 43 resume os resultados obtidos na modelagem de PTS para a média diária. Foram comparadas a área da pluma de máximos com comprometimento significativo do padrão de qualidade do ar primário (maior que 60% do PQAR), a área com violação do padrão primário, o valor máximo encontrado e o maior percentil verificado nos receptores críticos. O padrão primário para a média diária de PTS é de 240 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Tabela 43 - Comparação do impacto resultante dos diferentes cenários para as concentrações diárias de PTS.

	Área da pluma diária >60% PQAR (ha)	Área da pluma diária >100% PQAR (ha)	Máximo valor média diária ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Maior valor 98º percentil diário ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
CONAMA	709,7	20,6	410	186
SEMA	187,8	1,1	315	143
ÍNDIA	1.216,8	145,6	397	176
EUA	0,0	0,0	52	24
UE	0,0	0,0	28	13

Fonte:Autoria própria.

A área da pluma máxima onde houve comprometimento significativo da qualidade do ar (de 60-100% do PQAR) foi maior (praticamente o dobro) no cenário de emissões indiano, quando comparado ao do CONAMA. Já quando comparam-se as áreas do cenário da SEMA com a do CONAMA, percebe-se que houve uma

redução significativa (maior que 3 vezes) da área da pluma com comprometimento significativo, apesar de uma redução de apenas 23% da emissão e aumento da média da altura das chaminés de 2%. Nos cenários mais restritivos (EUA e UE) a pluma de máximos não atingiu comprometimento nem de 60% do PQAR.

Comparando-se as áreas das plumas das máximas médias diárias que ultrapassaram o padrão primário, o cenário de emissões da Índia foi o mais crítico, com uma área 7 vezes superior à causada pelas emissões do cenário do CONAMA. Para o caso das emissões do cenário da regulamentação paranaense (SEMA) a área foi quase 19 vezes inferior à do cenário de emissões nacional.

Na comparação de valores máximos das médias diárias, apesar de não ser o cenário com maior taxa de emissão, o cenário do CONAMA foi o que causou os maiores picos de concentrações. A altura de chaminés, consideravelmente superior no caso indiano, conseguiu reduzir as concentrações máximas causadas nos receptores. A redução da emissão nos cenários dos Estados Unidos e União Europeia fizeram com que as máximas concentrações médias comprometessem apenas 22% e 12% do PQAR primário, respectivamente.

Verificando os percentis no receptor crítico de cada cenário, houve um cenário similar ao das concentrações máximas. As condições de emissão do CONAMA ocasionaram as maiores concentrações do 98º percentil. As diferenças entre cenários mantiveram a mesma proporção do parâmetro anterior, apontando novamente que a elevação da altura das chaminés é uma boa alternativa para a redução dos picos de concentração. A Tabela 44 apresenta os valores concernentes às ultrapassagens do padrão primário de qualidade do ar, que apenas ocorreram nos cenários do CONAMA, SEMA e Índia.

Tabela 44 - Comparação de impacto dos cenários na ultrapassagem do padrão diário de PTS.

	Nº de receptores com violações do PQAR	Nº de violações totais do PQAR	Nº máximo de violações em um receptor
CONAMA	53	86	7
SEMA	3	3	1
ÍNDIA	198	504	14
EUA	0	0	0
UE	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

O número de pontos em que ocorreram ultrapassagens do PQAR foi praticamente 4 vezes maior no cenário de emissões indiano que no brasileiro. Já no cenário da SEMA, foram apenas 3 extrapolações do padrão, quase 10 vezes inferior ao número de receptores que o cenário nacional causou violação.

Quando se compara o número de violações totais do padrão primário de qualidade do ar, o caso indiano se torna ainda mais crítico, sendo o seu número de excedências mais de 5 vezes superior ao que ocorreu no cenário do CONAMA. Para esse critério de comparação o cenário brasileiro foi cerca de 30 vezes mais impactante que o paranaense.

Na avaliação do ponto onde houve maior número de ultrapassagens do PQAR primário, o cenário da Índia teve 14 ultrapassagens, o CONAMA 7 e a SEMA apenas 1. A Tabela 45 apresenta os parâmetros de comparação quanto a concentração média anual de PTS. O padrão de qualidade do ar para a média anual é de $80 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Tabela 45 - Comparação de impacto dos cenários na média anual da concentração de PTS

	Área da pluma anual >60% PQAR (ha)	Área da pluma anual >100% PQAR (ha)	Máximo valor média anual ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
CONAMA	188,5	1,9	101
SEMA	24,4	0,0	77
ÍNDIA	287,1	0,0	67
EUA	0,0	0,0	12
UE	0,0	0,0	7

Fonte: Autoria própria.

A área de comprometimento significativo (>60%) do PQAR para o padrão anual foi maior no cenário indiano, cerca de 1,5 vezes maior que o do CONAMA e 11 vezes superior ao da SEMA. Porém, o cenário do CONAMA foi o único que apresentou concentrações que superaram o PQAR primário anual. Novamente, o aumento da altura das chaminés do cenário indiano, apesar do incremento nas emissões, causou um abatimento das concentrações máximas.

4.3.2. Dióxido de Nitrogênio

A Tabela 46 apresenta os parâmetros que distinguem os cenários de emissão (concentração na emissão e altura de chaminé) para o avaliação com o NO₂.

Tabela 46 - Diferença entre os dados dos cenários de emissão para o NO₂

	Concentração de emissão NO₂ (mg.Nm⁻³)	Altura mínima chaminé (m)	Altura média chaminé (m)
CONAMA	650	-	12,4
SEMA	500	10	12,7
UE	250	-	12,4

Fonte:Autoria própria.

As comparações dos impacto relativos aos valores da média horária do NO₂ são apresentadas na Tabela 47. O padrão primário para a média horária de NO₂ é igual a 320 µg.m⁻³.

Tabela 47- Comparação do impacto dos diferentes cenários na concentração horária de NO₂.

	Área da pluma horária >100% PQAR (ha)	Máximo valor média horária (µg.m⁻³)	Maior valor 99,78º percentil horário (µg.m⁻³)
CONAMA	15.610	1.888	256
SEMA	6.340	1.457	197
UE	180	724	17

Fonte:Autoria própria.

A área da pluma de máximas concentrações que ultrapassou o PQAR primário foi maior para o cenário do CONAMA. Esta foi mais de 2 vezes superior que o cenário da SEMA e 87 vezes maior que a área causada pelo cenário da União Européia.

Na comparação dos picos, as condições de emissão do CONAMA causaram concentrações ambientais mais críticas: 30% superior ao máximo encontrado para a SEMA; e 2,5 vezes maior que o da UE. Apesar do aumento da altura média das chaminés, a proporção existente entre os cenários do CONAMA e da SEMA nas áreas de comprometimento do PQAR manteve-se para as concentrações máximas.

Comparando os valores do percentil no receptor crítico, o cenário da União Europeia foi substancialmente menos impactante que os demais, correspondendo a 7% da concentração causada pelo cenário do CONAMA e 8% do cenário da SEMA. A Tabela 48 apresenta a comparação entre a ultrapassagem do padrão primário nos diferentes cenários.

Tabela 48 - Comparação do impacto dos diferentes cenários na violação do padrão primário de NO₂

	Nº de receptores com violações do PQAR	Nº de violações	Nº máximo de violações em um receptor
CONAMA	8.708	671.972	1.040
SEMA	4.564	269.220	769
UE	344	9.797	254

Fonte:Autoria própria.

O número de receptores com ultrapassagens do PQAR no cenário do CONAMA foi praticamente o dobro do observado no cenário da SEMA e mais de 25 vezes superior ao do cenário da UE. O cenário do CONAMA causou a ultrapassagem do padrão de qualidade do ar em praticamente metade do total de receptores utilizados na modelagem (17.500).

A diferença de impacto dos cenários no critério anterior fica ainda mais acentuada quando o número de violações totais é verificado. O cenário de emissões baseado no limite nacional é 2,5 vezes mais impactante que o cenário de emissões paranaense, e causou 68 vezes mais violações que o cenário da União Européia. Quando avaliado o número máximo de ultrapassagens, novamente o cenário do CONAMA foi o mais impactante, seguido do paranaense e do europeu. A Tabela 49 mostra a comparação dos parâmetros de impacto da média anual de NO₂ (cujo padrão é igual a 100 µg.m⁻³)

Tabela 49 - Comparação do impacto dos cenários no padrão de qualidade do ar anual do NO₂.

	Área da pluma anual 60-80% PQAR (ha)	Área da pluma anual 80-100% PQAR (ha)	Máximo valor média anual (µg.m ⁻³)
CONAMA	12,5	0,2	90
SEMA	0,3	0,0	69
UE	0,0	0,0	34,4

Fonte:Autoria própria.

Apesar de ter sido ultrapassado diversas vezes para a média horária, na média anual não houve nenhuma extrapolação do padrão de qualidade do ar no cenário CONAMA. A área de comprometimento significativo do PQAR para o cenário de emissões nacional foi 41 vezes superior a que foi causada pelo cenário da SEMA. Quando os valores máximos causados por cada cenário são comparados, novamente o cenário europeu é o menos impactante, seguido pelo da SEMA e pelo do CONAMA, que atingiu praticamente 90% do PQAR.

5. CONCLUSÃO

Por meio da avaliação realizada com o modelo AERMOD utilizando estimativas com dados medidos de condições de emissão, e a concentração limite de regulamentações distintas, pode-se verificar que o controle da concentração na emissão pode ser eficiente no controle da poluição da qualidade do ar. Entretanto, seria necessário atingir concentrações muito inferiores aos atuais padrões nacionais.

No caso das condições de emissão estabelecidas pelo CONAMA, os padrões primários de qualidade do ar foram superados para a média diária de PTS, média anual de PTS e média horária de NO₂. Para o particulado total em média diária, a concentração máxima chegou a quase 2 vezes o padrão de qualidade do ar. Porém, o maior impacto seria o ocasionado pelo NO₂ de média horária, no qual a concentração máxima modelada atingiu valores de quase 6 vezes o PQAR, ultrapassando até o nível de atenção estabelecido na Resolução nº 03/1990 do CONAMA.

No cenário da SEMA, que considerou uma redução de 33% das emissões (tanto para o PTS quanto para o NO₂) e um aumento de 2% na média da altura das chaminés, ainda houve ultrapassagem do padrão primário da média diária de PTS e da média horária de NO₂.

Para as condições de emissão conforme a regulamentação indiana a altura de média de chaminés considerada foi 78% superior a média no local de estudo. Já as emissões foram 37% superiores ao limite brasileiro. Foi verificado que o aumento da altura da chaminé não é suficiente para reduzir o impacto para a concentração de emissão considerada. Apesar de haver uma atenuação dos valores máximos e das concentrações de médias a longo prazo, o comprometimento da qualidade do ar para a média diária se estendeu por uma área consideravelmente maior à dos outros cenários. O impacto desse cenário talvez foi subestimado devido ao fato do AERMOD ser um modelo estacionário (não há relação entre a concentração de um período temporal anterior e um posterior). Caso o modelo considerasse o acúmulo do poluente no ar, o impacto do cenário da Índia seria ainda maior. O aumento de chaminé pode ser uma alternativa interessante para contrapor a redução de taxa de emissão em locais em que o relevo é plano. Foi verificado que as concentrações máximas causadas pelo cenário de emissões da Índia ocorrem em eventos específicos, provavelmente com condições meteorológicas peculiares, já que foram apenas 5 valores de máxima diária de PTS registrados no *ranking*.

Para o cenário dos Estados Unidos e da União Europeia, o impacto foi insignificante para as médias diárias e anuais do PTS. Para o cenário de emissões estadunidenses a concentração da média diária atingiu no máximo 21% do padrão e a anual 16%. Já o europeu alcançou valores de até 12% do PQAR diário e 9% do anual. Para o NO₂, apesar de ser o cenário mais restritivo dentre os avaliados, as condições de emissão da União Europeia não seriam capazes de garantir a qualidade do ar para a média horária, uma vez que o valor máximo chegou a 226% do padrão primário de qualidade do ar, e houve 344 violações do padrão.

É necessário ressaltar que foram apenas consideradas as emissões das olarias. Caso fossem avaliadas as emissões de outras fontes importantes (veículos e outras indústrias), bem como valores de concentração de fundo dos poluentes avaliados, a ineficiência dos padrões nacionais poderia ser ainda mais evidente do que foi apresentado. Além disso, as comparações das concentrações ambientais simuladas pelo modelo foram feitas com a Resolução 03/1990 que data de mais de 20 anos. Caso o Brasil tivesse seus padrões de qualidade do ar atualizados (mais restritos, como se observa internacionalmente), a inadequação dos padrões de emissão seria maior.

Os resultados não apontam para uma apologia aos padrões estadunidense e europeu. As indústrias nesses locais possuem um nível tecnológico mais elevado, utilizando meios de produção e matrizes energéticas menos poluentes, o que propicia padrões de emissão mais restritivos. Ainda assim, o padrão de emissão brasileiro é muito generalista, uma vez que não consegue lidar com peculiaridades de setores específicos que não são regulamentados. Como comparação, no Brasil são regulamentadas 15 atividades, 13 pelas Resoluções CONAMA nº 382/2006 e CONAMA 436/2011, uma pela CONAMA nº 264/2009 e uma pela CONAMA 316/2002. Já nos Estados Unidos, a grosso modo são mais de 70. No Brasil, para o setor cerâmico não há limites para poluentes importantes que são gerados na produção como os compostos fluoretados e clorados, além do mercúrio. A criação de padrões de emissão regionais seria mais efetiva no resguardo da qualidade do ar. Isso porque a legislação de padrões de emissão no Brasil ser inespecífica, e porque há grande influência de fatores regionais (como a meteorologia, a saturação da bacia aérea, a topografia, o adensamento industrial, dentre outros) na ocorrência das concentrações ambientais de poluentes.

Existe a necessidade do Brasil atualizar a maneira com a qual a poluição atmosférica é gerida. Os padrões de qualidade do ar remontam

a regulamentações da década de 70. Os instrumentos definidos pelo Programa Nacional de Qualidade do Ar no final da década de 80 até hoje não foram instituídos, ou estão defasados: os padrões de qualidade do ar; padrões de emissão; programa nacional de avaliação da qualidade do ar; programa nacional de inventário de fontes poluidoras do ar; e os programas estaduais de controle da poluição do ar.

Apesar da liberdade que as regulamentações federais dão aos estados para estabelecer limites de emissão, poucos estados possuem legislação sobre emissão própria. Nesse interim, o emprego de modelos de dispersão para o estabelecimento de limites de emissão em áreas onde há um grande adensamento industrial, surge como uma ferramenta importante.

Com o desenvolvimento dos modelos de dispersão atmosférica o gerenciamento da qualidade do ar, ao mesmo tempo que é facilitado pelo número de ferramentas existentes, também se torna complexo pois há de se ter, além de capacitação para o uso dessas utilidades, de fontes de dados confiáveis, sejam eles meteorológicos, ou de um inventário de emissão. Para isso é necessário que haja um fortalecimento dos órgãos ambientais estaduais para que eles não se restrinjam a entidades que lidam meramente com o licenciamento ambiental, mas sim como atores decisivos no gerenciamento dos recursos naturais e da qualidade das diversas matrizes ambientais.

No caso do monitoramento ambiental, poucos são os estados com monitoramento da qualidade do ar adequado. Combinados, o monitoramento ambiental do ar e a modelagem são instrumentos essenciais para a avaliação da efetividade de políticas públicas para o controle da poluição do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARBEX, Marcos Abdo. **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara - SP.** Tese (Doutorado em Patologia) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-07042003-231607/>>. Acesso em: 13 de Dezembro de 2014.

BAIRD, Colin. **Química ambiental.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 622p. ISBN 8536300027

BOUÇAS, Janaína Gonçalves. **Aplicação de técnicas nucleares nos estudos de avaliação da poluição do ar da região metropolitana de Belo Horizonte.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://www.bdtd.cdtm.br//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=112>. Acesso em: 25 de Novembro de 2014.

BRASIL. Senado Federal. **Legislação Brasileira de resíduos sólidos e ambiental correlata.** 1ª ed. Brasília. 1999.

BRICK DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Brick for Life.** 20-?. Disponível em: <<http://brick.org.uk/wp-content/uploads/2011/05/BRICK-FOR-LIFE.pdf>>. Acesso em: 06 de Janeiro de 2015.

BRODE, Roger. **AERMOD Evaluations Under the AERMOD Evaluations Under the 1-hour NO₂ and SO₂ NAAQS.** 10th Conference on Air Quality Modelling. Durham, Carolina do Norte, Estados Unidos. 2012. Disponível em: <http://www.epa.gov/scram001/10thmodconf/presentations/2-8-Brode_10thMC_AERMOD_Evals_1hr-NO2-SO2_NAAQS_Final_3-25.pdf>. Acesso em 15 de Dezembro de 2014.

CAPUTO, Marcelo; GIMÉNEZ, Marcelo; SCHLAMP, Miguel. Intercomparison of Atmospheric Dispersion Models. **Atmospheric Environment.** Volume 37, p.2435-2449, 2003.

CO, H.; DUNG, N.; LE, H.; AN, D. ; CHINH, K.; OANH, N. Integrated management strategies for brick kiln emission reduction in Vietnam: a case study. **International Journal of Environmental Studies**, 66(1), 113-124, 2009.

COELHO, Cristiane Degobbi. **Análise dos contaminantes biológicos presentes no material particulado (PM_{2,5}) de amostras da região metropolitana de São Paulo**. Tese (Doutorado em Patologia) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-25092009-144040/>>. Acesso em: 27 de outubro de 2014

COLÚMBIA BRITÂNICA. **Guidelines for Air Quality Dispersion Modelling in British Columbia**. Vitória, Colúmbia Britânica, Canadá. 2008. Disponível em: <http://www.bcairquality.ca/reports/pdfs/air_disp_model_08.pdf>. Acesso em 20 de janeiro de 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2013**. 2014a. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 5 de Janeiro de 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual para Elaboração de Estudos par o Licenciamento com Avaliação de Impacto Ambiental**. 2014b. Disponível em < <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/dd/Manual-DD-217-14.pdf>>. Acesso em: 5 de Dezembro de 2014.

CONGEDO, Luca. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, Release 2.5.1**. [s.l.]. 2014. Disponível em: <<https://media.readthedocs.org/pdf/semiautomaticclassificationmanual/atest/semiautomaticclassificationmanual.pdf>>. Acesso em: 10 de Novembro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 05 de 15 de Junho de 1989**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res89/res0589.html>>. Acesso em: 22 de Outubro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 03 de 28 de Junho de 1990.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 25 de Novembro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 08 de 6 de Dezembro de 1990.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0890.html>>. Acesso em: 25 de Outubro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 264 de 26 de Agosto de 1999.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=262>>. Acesso em: 25 de Outubro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Transcrição da 70ª Câmara Técnica de Controle Ambiental de 08 de Agosto de 2002.** 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir20/Transc70aCTdeControlAmbiental_08ago02.pdf>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Ata da 4ª Reunião do Grupo Técnico para Definição de Padrões de Emissão de Poluentes Atmosféricos por Fontes Fixas, de 3 a 4 de Novembro de 2003.** 2003. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir431/Ata4aReunGTFontesFixas3e411.doc>>. Acesso em: 09 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Proposta para discussão - Sub-grupo do Paraná - Limites de emissão para poluentes atmosféricos gerados em processos de geração de calor a partir da combustão de derivados da madeira.** 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/198FC8A8/Biomassa14052004.pdf>>. Acesso em: 05 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resultado da 9ª Reunião Grupo Técnico para Definição de Padrões de Emissão de Poluentes Atmosféricos por Fontes Fixas, de 14 a 15 de Abril de 2005.** 2005b. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/198FC8A8/Result9aR eunFontes.zip>>. Acesso em: 08 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Ata da 11ª Reunião do Grupo Técnico para Definição de Padrões de Emissão de Poluentes Atmosféricos por Fontes Fixas, de 23 a 24 de Novembro de 2005.** 2005a. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir694/AtaReun11Brasilia a.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir694/AtaReun11Brasilia.pdf)>. Acesso em 11 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº382 de 26 de dezembro de 2006.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 22 de Outubro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resultado da 22ª Reunião da Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental.** 2007. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir869/Result22aCTCQA0803.pdf>>. Acesso em: 11 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Ajuda-memória do 1º Grupo Técnico Emissão de Poluentes Atmosféricos por Fontes Fixas.** 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1092/Memoria1oGTF ontesFixas_25set08.pdf>. Acesso em: 06 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Proposta de resolução (versão 1) de limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira.** 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1298/PropResol_DerivadosMadeiraVers%2001.pdf>. Acesso em: 08 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA).

Resultado do 11º Grupo Técnico de Emissão de Poluentes

Atmosféricos por Fontes Fixas. 2011a. Disponível em: <

http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1373/Resultado_11aGTFontesFixas_02e03fev11.pdf>. Acesso em: 08 de Janeiro de 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA).

Resolução nº 436 de 22 de dezembro de 2011. 2011b. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>.

Acesso em: 22 de Outubro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA).

Proposta de Revisão da Resolução CONAMA 03/1990 sobre Qualidade do Ar - Versão LIMPA. Procedência: 7º Reunião do GT Qualidade do Ar. 2014. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/C1CB3034/PropResol_7GTQualidAr_LIMPA.pdf>. Acesso em: 08 de Janeiro de 2015.

CUNHA, Yasmine Moura da. **Aspectos da paisagem oleira de Morro da Fumaça (SC).** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Florianópolis, 2002.

DADAM, Alessandro Pedro. **Análise térmica de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha [107] f.** Dissertação

(Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2005. Disponível em:

<<http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0893.pdf>>. Acesso em: 30 de outubro de 2014.

EGAN, Bruce A.; MURPHY, Brian L. **Forensic Air Dispersion Modeling and Analysis.** Introduction to Environmental Forensics. Elsevier Science & Technology, Capítulo 12 p.578-610, 2007.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA). **Federal Register, 40 CFR, Part 51 Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions.** Vol. 70, n. 217.

Novembro de 2005. Disponível em:

<http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw_05.pdf>. Acesso em: 12 de Novembro de 2014.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA). **Proposed Rule National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP): Brick and Structural Clay Products Manufacturing and Clay Ceramics Manufacturing.** 2014. Disponível em:

<<https://federalregister.gov/a/2014-28125>>. Acesso em 20 de Novembro de 2014.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **The Application of Models Under the European's Union Air Quality Directive: A Technical Reference Guide. EEA Technical report n° 10/2011.** 2011.

Disponível em:

<<http://www.eea.europa.eu/publications/fairmode/download>>. Acesso em 15 de Janeiro de 2015.

EUROPEAN TOPIC CENTRE. **Guide on modeling Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive.** Bilthoven. 2011. Disponível em:

<http://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACM_TP_2011_15_FAIRMODE_guide_modelling_NO2.pdf> Acesso em: 10 de Dezembro de 2014.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (FIESC). **Santa Catarina em dados 2014.** Florianópolis, v. 24, 2014. 192p. Disponível em:

<http://fiesc.com.br/sites/default/files/medias/25_set_sc_dados_2014_em_baixa_para_site.pdf?_ga=1.255326657.895298454.1421613315>. Acesso em 02 de Dezembro de 2014

FREEDMAN, Susan. Output-Based Emission Standards: Advancing Innovative Energy Technologies. **The Electricity Journal.** Volume 16-2, , p.32-37, Março de 2003

GODISH, Thad. **Air quality**. 2. ed. Chelsea: Lewis, c1991. 422p.

HOINASKI, Leonardo. **Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP₁₀)**. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2010. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PGEA0376-D.pdf>>. Acesso em: 19 de Outubro de 2014.

HOLMES, N.S.; MORAWSKA, L.. A Review of Dispersion Modelling and its Application to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available. **Atmospheric Environment**, Volume 40, n.30, p.5902-5928, Setembro de 2006.

INDIA. Ministério do Meio Ambiente e Florestas. **Comprehensive Industry Document With Emission Standards Guidelines and Stack Height Regulation for Vertical Shaft Brick Kilns (VSBK) vis-à-vis Pollution Control Measures**. 2007. Disponível em: <http://www.ecacwb.org/editor_upload/files/aaaa.pdf>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Classificação Nacional de Atividades Econômicas Versão 2.0**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/classificacoes/cnae2.0/cnae2.0.pdf>>. Acesso em: 11 de novembro de 2014..

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Topodata: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para o Refinamento Unificado de Dados SRTM**. São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>>. Acesso em: 12 de Dezembro de 2014.

KAWAGUTI, Wagner Mitio. **Estudo do comportamento térmico de um forno intermitente tipo paulistinha utilizados na indústria de cerâmica vermelha**. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2005. Disponível em: < <http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0890.pdf>>. Acesso em: 31 de outubro de 2014.

LORA, Electo E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 1. ed., [s.l.] Interciência, 503p., 2000.

MARTINS, Marco Antonio Garcia. **Variação da composição e toxicidade do material particulado ao longo do dia na cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Patologia) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-27082010-175749/>>. Acesso em: 24 de Novembro de 2014.

MESINK, Clemens; LEFEBRE, Filip; DE RIDDER, Koen. Developments and Applications in Urban Air Pollution Modelling. **Advances in Air Pollution Modelling for Environmental Security – NATO Science Series**. [s.l.], Springer, Vol. 54, p.297-308. MIDDLECAMP, Catherine; KELLER, Steven W.; ANDERSON, Karen; BENTLEY, Anne; CANN, Michael; ELLIS, Jamie. **Chemistry in Context**. 7. ed.: [s.l.], McGraw-Hill, 2011. 592 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional - Ano base 2013**. Brasília. 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em 01 de Dezembro de 2014.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE). **Relação Anual de Informações Sociais (RAIS)**. Brasília. 2013. Disponível em: <<http://bi.mte.gov.br/bgcaged/login.php>>. Acesso em 03 de Dezembro de 2014.

MINISTÉRIO PÚBLICO DE SANTA CATARINA (MP/SC). **Termo de Retificação e Ratificação ao Compromisso de Ajustamento de Condutas Firmado com a Indústria de Cerâmica Vermelha e de Revestimento**. 2007. Disponível em: <http://www.mp.sc.gov.br/portal/site/contendo/cao/cme/atividades/polui_cao_atmosferica/olarias.doc>. Acesso em: 06 de Agosto de 2014.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE (NAS). **Air Quality Management in the United States**. 1 ed., Washington, Estados Unidos, National Academy Press, 401p., 2004. Disponível em: <http://download.nap.edu/cart/download.cgi?&record_id=10728>. Acesso em 10 de Dezembro de 2014.

NATIONAL AERONAUTICAL AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Shuttle Radar Topography Mission Technical Fact Sheet**.1998. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/factsheet_tech.pdf>. Acesso em 08 de Janeiro de 2015.

NOVA ZELÂNDIA. **Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modeling**.Wellington, 2004. Disponível em: < <http://mfe.govt.nz/publications/air/atmospheric-dispersion-modelling-jun04/atmospheric-dispersion-modelling-jun04.pdf>>. Acesso em 14 de novembro de 2014.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. [s.l.], Cambridge University Press, 2001. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/>>. Acesso em 11 de Janeiro de 2015.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **WHO Air Quality Guidelines Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide**.2005. Disponível em: <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf>. Acesso em 22 de Outubro de 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **The Health Effects of Indoor Air Pollution Exposure in Developing Countries**. 2002. Disponível em: <http://www.who.int/indoorair/publications/health_effects/en/> Acesso em 10 de Janeiro de 2015

PARANÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). **Resolução nº 016/2014**.Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RES_SEMA_016_2014.pdf>. Acesso em 10 de Dezembro de 2015.

PEREIRA JR., José de Sena. **Legislação Brasileira Sobre Poluição do Ar**. Consultoria Legislativa. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputado, 2007. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/1542>>. Acesso em 11 de Janeiro de 2015.

REDIVO, Rosânio Bortolato. **Uma análise da gestão de empresas produtoras de cerâmica vermelha do sul de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://tede.ufsc.br/teses/PEPS5121.pdf>>. Acesso em: 01 de novembro de 2014.

REGIONAL ENERGY RESOURCES INFORMATION CENTER (RERIC). **Small and medium scale industries in Asia: Energy and environment, brick and ceramic sectors**. Bangkok: Asian Institute of Technology. 2003. Disponível em: <http://www.faculty.ait.ac.th/visu/Data/Publications/Chapters%20&%20books/BRICK_AND_CERAMIC.pdf>. Acesso em : 02 de janeiro de 2015.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia das Minas e Energia. **Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina**. Florianópolis, 1990.

SÃO PAULO. **Decreto nº 59.113 de 23 de Abril de 2013**. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/norma/?id=170057>>. Acesso em: 05 de Janeiro de 2015.

SEINFELD, John H; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. 2. ed.: [s.l.], Wiley, 2006. 1225 p.

SOUZA, Thiago A. B.; PAVEI, Paula T. Avaliação da Concentração dos Principais Poluentes Atmosféricos Monitorados na Região Sul de Santa Catarina. **Tecnologia e Ambiente**, Volume 16, p.1-21, 2010.

STOCKIE, John M. The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modelling. **SIAM Review**, Volume 53, n. 2, p.349-372, 2011.

UNIÃO EUROPEIA (UE). **Guidance on Assessment Under the EU Air Quality Directives – Final Draft.** 54p, 2000. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/guidanceunderairquality.pdf>>. Acesso em 5 de Janeiro de 2015.

UNIÃO EUROPEIA (UE). **Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry.** 2007. Disponível em: <http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf>. Acesso em: 06 de Janeiro de 2015.

UNIÃO EUROPEIA (UE). **Guidance on Air Quality Assessment Around Point Sources Under the EU Air Quality Directive 2008/50/EC.** 8p, 2010. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/Guidance%20on%20assessment%20around%20point%20sources%20AQCincluded_final.pdf>. Acesso em 03 de Janeiro de 2015.

UNITED KINGDOM DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD & RURAL AFFAIRS (UKDEFRA). **Expert Panel on Air Quality Standards Airborne Particles: What is the appropriate measurement on which base standard? A Discussion Document.** [s.l.] 2001. Disponível em: <http://www.defra.gov.uk/environment/airquality/aqs/air_measure/index.htm>. Acesso em: 12 de Dezembro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Chapter 11: Mineral Products Industry, Section 7: Ceramic Clay Manufacturing.**[s.l]. 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Pollution Training Institute - RE 413:Control of Particulate Emissions.** [s.l.] 1999. Disponível em <<http://www.apti-learn.net/>>Acesso em: 14 de Janeiro de 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Quality Criteria for Particulate Matter**. [s.l.] 2004a. Vol. I. Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=87903>>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD**. 2004b. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermod_userguide.zip>. Acesso em 12 de Setembro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)**. 2004c. Disponível em: <<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermetugb.pdf>>. Acesso em 02 de Outubro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Terms of Environment: Glossary, Abbreviations, and Acronyms**. [s.l.] 2009a. Disponível em <http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do>. Acesso em: 18 de Janeiro de 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Integrated Science Assessment for Particulate Matter**. 2009b. Disponível em: <http://www.epa.gov/ncea/pdfs/partmatt/Dec2009/PM_ISA_full.pdf>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Pollution Training Institute – RE-100: Basic Concepts in Environmental Sciences**. [s.l.] 2010. Disponível em: <<http://www.apti-learn.net/>>. Acesso em: 03 de Dezembro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Pollutants**. [s.l.] 2012a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/air/airpollutants.html>>. Acesso em: 18 de Janeiro de 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Extramural Research: Particulate Matter**. 2012b. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ncer/science/pm/>>. Acesso em 15 de Outubro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Prevention of Significant Deterioration (PSD) Basic Information**. 2014. Disponível em: <<http://www.epa.gov/NSR/psd.html>>. Acesso em 11 de Dezembro de 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2009-3087**. [s.l.], 2009. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3087/pdf/fs2009-3087.pdf>>. Acesso em 18 de Novembro de 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat-A Global Land-Imaging Mission: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012-3072**. [s.l.]. 2012. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf>>. Acesso em 15 de Dezembro de 2014.

VALLERO, Daniel A. **Fundamentals of Air Pollution**. 4. Ed.: [s.l.], Elsevier, 2008. 942 p.

VIEIRA, Neise R. **Poluição do ar: indicadores ambientais**. Rio de Janeiro, E-papers, 2009. 220p.