

## MODELAGEM MATEMÁTICA GAUSSIANA DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE MATERIAL PARTICULADO E GASES: ESTUDOS DE CASO APLICADOS A FONTES POLUIDORAS LOCALIZADAS NA REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA – ES

Bruno Furieri<sup>1</sup>, Enilene Regina Lovatte<sup>2</sup>

Bernard Salume Sobral, Claudia Rodrigues Carneiro Camargo, Evandro Roncete Deorce, Fernanda Luiza de Lima Marques, Karolini Bonadiman Agrizzi, Maria Luiza da Cunha Oliveira Santos, Suelen Marques de Melo, Thais Dalvi Souza<sup>3</sup>

**Resumo:** A qualidade do ar em ambientes urbanos é uma grande preocupação dos gestores ambientais. Realizou-se a modelagem da dispersão de poluentes com AERMOD de fontes na Região Metropolitana da Grande Vitória: cerâmica, papel e celulose, veículos e odores em estações de tratamento de esgoto. Destacam-se como conclusões: obstáculos com maior altura tiveram grande influência promovendo o abaixamento da pluma (*downwash*) e concentrações mais elevadas no solo. Mostrou-se a importância em se avaliar a localização de um conjunto de fontes anteriormente à implantação de um empreendimento, emissões veiculares possuem cálculo complexo de taxa de emissão, e a modelagem de H<sub>2</sub>S mostrou-se bem adequada, visto que a pluma calculada possui boa concordância com o que é rotineiramente observado pela população.

**Palavras-chave:** Dispersão atmosférica. Modelagem matemática. Modelos gaussianos. Material particulado. Gases odorantes.

## GAUSSIAN MATHEMATICAL MODELLING OF ATMOSPHERIC DISPERSION OF PARTICULATE MATTER AND GASES: CASE STUDY OF POLLUTING SOURCES LOCATED IN THE METROPOLITAN REGION OF GRANDE VITÓRIA – ES

**Abstract:** Air quality in urban environments is a major concern for environmental managers. AERMOD pollutant dispersion modeling was carried out for sources in Grande Vitória Metropolitan Region: ceramics, paper and cellulose, vehicles and odors in sewage treatment plants. The main conclusions were: obstacles with greater height had a great influence in reducing downwash and higher concentrations on the ground. It was important to evaluate the location of a set of sources before the implementation of an industrial site, vehicular emissions have complex calculation of emission rate and the modeling of H<sub>2</sub>S has presented well done since the calculated plume has a good agreement with what is routinely observed by the population.

**Key words:** atmospheric dispersion, mathematical modelling, Gaussian models, particulate matter, odorous gases.

<sup>1</sup> Docente em Engenharia Sanitária e Ambiental no Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória – ES. Contato: bruno.furieri@ifes.edu.br.

<sup>2</sup> Docente em Segurança do Trabalho no Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória – ES. Contato: enilene.lovate@ifes.edu.br.

<sup>3</sup> Discentes em Engenharia Sanitária e Ambiental no Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.

## INTRODUÇÃO

Os níveis crescentes de urbanização e industrialização têm sido acompanhados por um aumento na degradação ambiental, que impacta a qualidade de vida das populações (PRINCEVAC et al., 2010), sendo as principais fontes poluidoras os automóveis e as unidades industriais (SANTOS; VAREJÃO; SILVA, 2011). A poluição do ar tornou-se uma grande preocupação, uma vez que tem levado a um aumento da incidência de doenças respiratórias agudas em crianças, que é uma das principais causas de internações em hospitais nos grandes centros (CASTRO et al., 2007). O incômodo devido à deposição de partículas nas superfícies de uso cotidiano é objeto de pesquisas recentes na Grande Vitória (MELO, 2015). Foi demonstrado que, na Região Metropolitana da Grande Vitória, aproximadamente 80% das pessoas sentem-se incomodadas ou muito incomodadas pelos altos níveis de concentração de poluentes na atmosfera.

O comportamento da dispersão de poluentes no entorno de unidades industriais é um assunto de interesse para arquitetos, órgãos ambientais reguladores e meteorologistas da poluição do ar. Trata-se de um problema preocupante, principalmente para os habitantes das edificações vizinhas, sejam estas industriais, residenciais ou comerciais, visto a possibilidade de exposição destes a concentração de contaminantes acima dos padrões estabelecidos para a qualidade do ar (PAULA; SANTOS; REISEN, 2002).

Sabe-se que as diversas formas de uso e ocupação do solo influenciam diretamente na dispersão de poluentes do ar nos grandes centros urbanos. Isto porque o processo de urbanização é determinante para o surgimento das indústrias, de volume e tráfego de veículos e de edificações comerciais e residenciais (ARAUJO, 2012). Estas estruturas tendem a comportar-se como obstáculos para a dispersão de poluentes atmosféricos, acrescentando rugosidade à superfície natural do terreno. Ainda, o posicionamento das fontes próximas à costa tem forte influência na dispersão dos poluentes. O último inventário de emissões atmosféricas publicado pelo órgão ambiental do Espírito Santo revela a grande parcela de poluição proveniente dos veículos e sua movimentação.

O aumento de rugosidade nas áreas urbanas, em relação às áreas rurais, promovido por esses obstáculos, provoca a redução da velocidade do vento. Isto está relacionado à geometria dos prédios, ao traçado das vias e à estrutura e morfologia das cidades, que alteram o comportamento dos ventos, enquanto este, por sua vez, altera o padrão de dispersão dos poluentes atmosféricos (ZURITA; TOLFO, 2000).

A Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) constitui-se de uma área urbana com economia baseada no comércio, na prestação de serviços e abriga complexos industriais de atividades variadas, além de abrigar a maior parte da população do estado do Espírito Santo, apresentando assim, uma morfologia complexa (FREITAS et al., 2016; SILVA; GAGNO; JESUS, 2008).

Dentre as diversas atividades industriais presentes na RMGV, inserem-se como muito importantes: siderurgia, manipulação e estocagem de materiais granulados, estações de tratamento de esgoto, fabricação de revestimentos cerâmicos e cimento. Poucos são os estudos que avaliam a dispersão de poluentes de forma global em uma região urbana densamente povoada como a RMGV. Ainda não foram encontradas, na literatura, aplicações práticas de forma simultânea de vários tipos de fontes. Nesse sentido, os estudos de composição e dispersão de poluentes nestas indústrias são de extrema importância no contexto nacional e local, e como ferramenta para execução destes tem-se as simulações experimentais e numéricas.

Estudos experimentais e numéricos demonstram que a presença de obstáculos, tais como prédios e residências, nas proximidades de fontes emissoras, como as fabricas de cerâmicas, altera significativamente o padrão de escoamento atmosférico (MELO et al., 2014; DEMUNER; PAULA, 2011; AUBRUN; LEITL, 2004; MAVROIDIS, 2003; SADA; SATO, 2002; MURAKAMI, 1993). Ainda que os métodos citados sejam ambos indicados para esse tipo de avaliação, a modelagem matemática apresenta-se como mais vantajosa em relação aos estudos experimentais, por estimar as concentrações de um ou mais poluentes atmosféricos que poderiam ocorrer em uma situação de pior cenário, ou para cenários alternativos de emissão e de meteorologia, independentemente da localização da fonte emissora e dos receptores, demandando menos tempo e com um custo relativamente menor (AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, 1997).

Dentre os modelos matemáticos disponíveis, tem-se o AERMOD como um dos mais utilizados pelas agências reguladoras, o qual consiste em um modelo recomendado pela USEPA (Agência Norte-Americana de Proteção ao Meio Ambiente, do inglês *United States Environmental Protection Agency*), sendo amplamente empregado na estimativa da dispersão de poluentes. Trata-se de um modelo estacionário e gaussiano baseado nos conceitos de estrutura da turbulência da camada limite planetária, incluindo o tratamento, tanto de fontes superficiais, quanto elevadas, como também de terrenos planos ou acidentados (CAMARA, 2015).

Diversos autores estudaram a dispersão atmosférica de poluentes através do modelo AERMOD, obtendo variadas contribuições para a avaliação de conformidade com os padrões legais existentes e para a estimativa das concentrações de emissões ao redor de fontes estacionárias, com e sem a presença de obstáculos (CAMARA, 2015; GOMES; BIASUTTI, 2012; BARBON; GOMES, 2010; BARRETO; ALBERTO; RODRIGUES, 2010; SILVA; BARRETO NETO, 2009).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é aplicar a metodologia de modelagem matemática de dispersão atmosférica para a Região Metropolitana da Grande Vitória, em que serão avaliadas três fontes industriais e também emissões veiculares. Cada fonte terá como interesse a avaliação em paralelo de uma característica que influencia diretamente na pluma de poluentes, como: (i) a qualidade do ar na região com relação à presença de obstáculos ao redor e na proximidade das fontes, (ii) fontes próximas à região costeira ao norte e ao sul da principal mancha urbana, (iii) lagoas de estabilização sendo quantificadas como fontes de área e (iv) destaque de algumas avenidas da RMGV para simulação como fontes de linha.

O modelo foi utilizado para simular concentrações de poluentes buscando uma comparação quanto ao atendimento aos padrões estabelecidos no Decreto Estadual nº 3463-R, de 2013, com mero intuito educativo de compreensão dos impactos de uma fonte poluidora para a população. Tal estudo se justifica pelo baixo quantidade de investigações numéricas relacionadas a aplicações práticas da metodologia em regiões urbanas utilizando-se de dados de emissão de inventários, especialmente na RMGV. O estudo apresentado é parte do que foi desenvolvido conjuntamente por alunos e professores

de disciplinas específicas do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo.

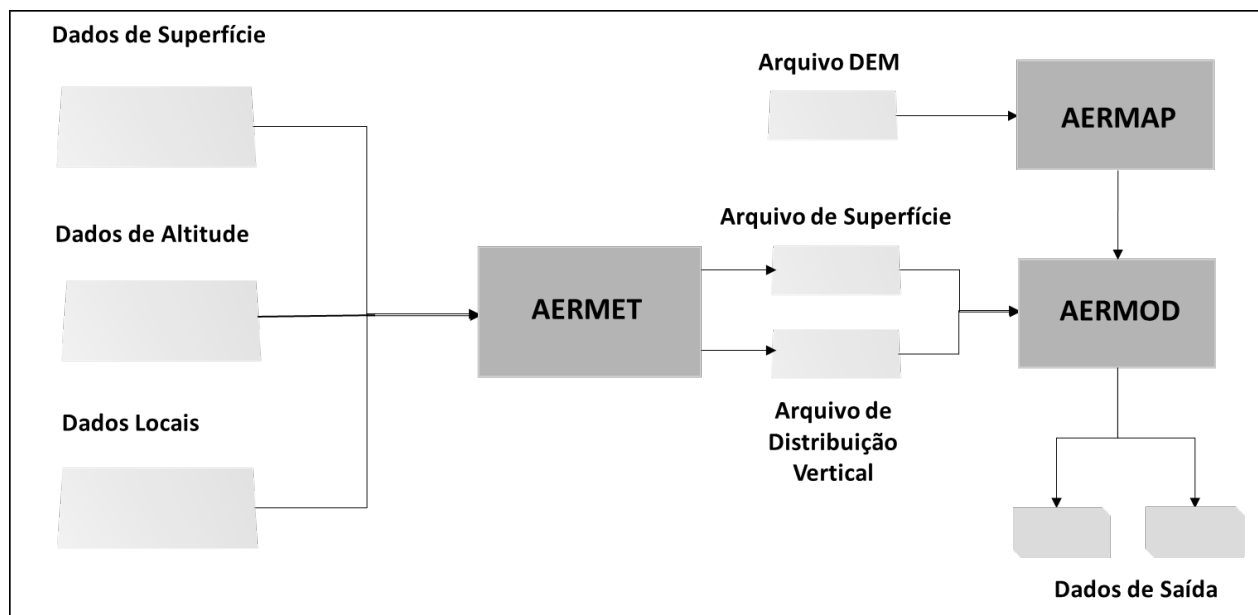
## **PERCURSO METODOLÓGICO**

A metodologia empregada no presente trabalho está detalhada nesta seção e subdivida em três tópicos: (i) modelo gaussiano de dispersão atmosférica e ferramenta computacional AERMOD, (ii) apresentação da meteorologia da região por meio da rosa dos ventos no período investigado e (iii) descrição sucinta dos processos industriais avaliados, juntamente com a apresentação topográfica da região de instalação da potencial fonte poluidora.

### **Modelagem Matemática e da Ferramenta Computacional**

O AERMOD utiliza-se de dois pré-processadores nas etapas de modelagem matemática da dispersão atmosférica: o AERMET e o AERMAP. O AERMET consiste em um pré-processador de dados meteorológicos, calculando os parâmetros da camada limite planetária necessários para a quantificação da dispersão no AERMOD. Já o AERMAP faz um pré-processamento de dados do terreno, localizando no domínio computacional as principais fontes emissoras e os receptores, fornecendo, posteriormente, dados de caracterização do terreno e uma malha receptora para o modelo de dispersão AERMOD (EPA, 2004). Ferreira (2005) elaborou um fluxograma demonstrando o funcionamento do modelo AERMOD, ilustrando os dados de entrada, pré-processadores e o arquivo final, conforme a **Figura 1**.

**Figura 1:** Fluxograma de funcionamento do modelo AERMOD



Fonte: Adaptado de Ferreira (2005).

Na **Figura 1**, os dados de superfície e dados de altitude representam medições meteorológicas de forma a calcular a estabilidade atmosférica por meio do Comprimento de Monin-Obukhov. Especificamente, dados de superfície são obtidos por anemômetros a uma altura pré-determinada, normalmente a 10 metros em relação ao solo. Dados de altitude, por sua vez, são medições a várias altitudes ao longo da troposfera, obtidos com balões meteorológicos. Ambos os dados são fornecidos por organizações especializadas que disponibilizam tais medições em sítios na internet. Por fim, dados locais são principalmente a delimitação do uso e ocupação do solo, a qual embasa a setorização da área de estudo: áreas urbanas muito edificadas e pouco edificadas, áreas rurais, área industrial e mar.

Para o cálculo das concentrações dos poluentes em um determinado ponto do espaço, o AERMOD modela a pluma em função de sua distribuição horizontal, vertical e do acúmulo de poluentes em função do efeito da parede caracterizada como solo. Nesse sentido, o modelo resolve, dentre outras, a Equação 1, a seguir:

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

Onde:

$F_y = \left( -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right)$ , correspondendo a parcela da concentração relativa a dispersão segundo a

direção do vento;

$C_d$  = concentração de um poluente num ponto qualquer do espaço [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ];

$x, y$  = coordenadas cartesianas que identificam o ponto analisado (m);

$z$  = altitude média do ponto analisado, em relação ao nível do mar (m);

$Q$  = taxa de emissão do poluente ( $\text{g s}^{-1}$ );

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

$u$  = velocidade média do vento na altura da emissão ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\lambda$  = coeficiente de ponderação da distribuição;

$\sigma_{zj}$  = dispersão vertical total da pluma (m);

$\psi_{dj}$  = altura entre a base da fonte e a linha central da pluma (m);

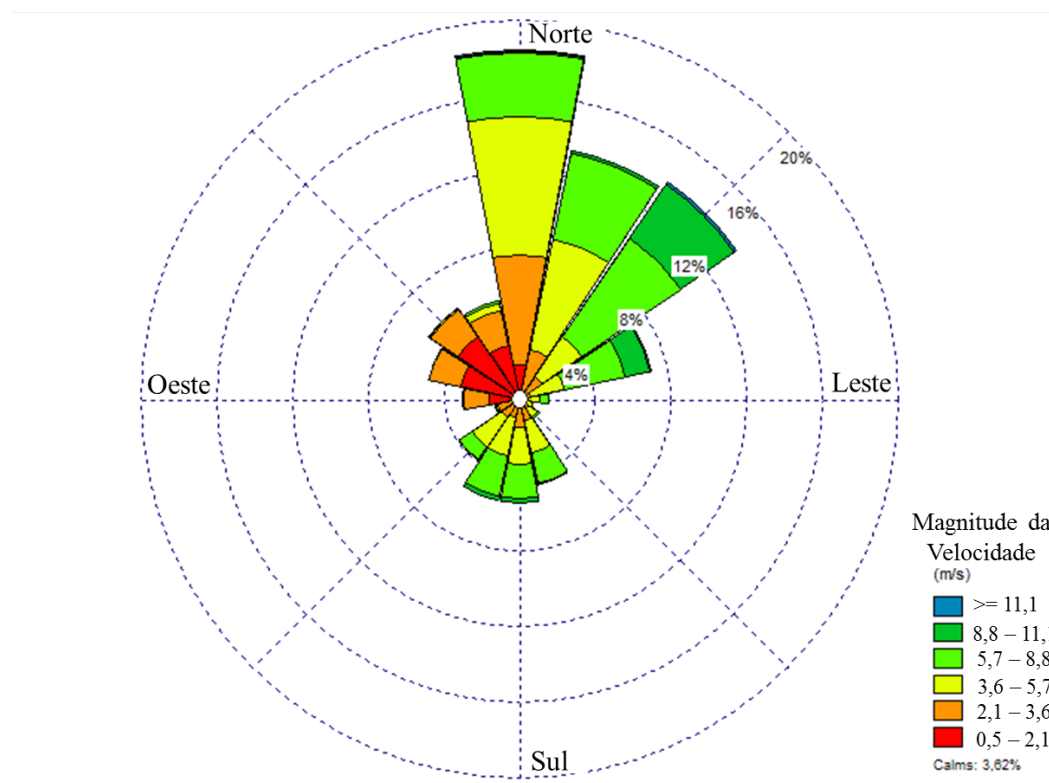
$z_i$  = altura da camada convectiva (m).

## Dados meteorológicos das regiões investigadas

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática, localizada em Vitória, ES (Latitude  $-20.271094^\circ$  e Longitude  $-40.306089^\circ$ ). Esta estação coleta dados de direção e velocidade dos ventos, pressão, temperatura e umidade do ar, precipitação e radiação solar a uma altitude de 9 metros.

Para elaboração da rosa dos ventos (**Figura 2**) da área de estudo, foram utilizados dados horários de direção e velocidade dos ventos para os 365 dias do ano de 2015. Para esta rosa dos ventos, está sendo considerada a direção meteorológica, que é a indicação de onde o vento sopra. Verifica-se a predominância dos ventos norte e nordeste com uma pequena parcela sudoeste. Na Região Metropolitana da Grande Vitória, ocorre, nos meses de abril a setembro, uma inversão dos padrões de ventos, os quais passam a ser sul durante estes meses. É esta situação que ocasiona a presença de uma pequena parcela de ventos sul na rosa dos ventos, representando a média anual. Ainda, a classe de velocidade dos ventos entre 3,6 e 5,7 ocorreu em 27,0% dos dados, enquanto a classe de ventos entre 5,7 a 8,8 m/s ocorreu em 24,4% dos dados.

**Figura 2:** Rosa dos ventos representando a média anual de direção e velocidade do vento para a Região Metropolitana da Grande Vitória.





Fonte: Autoria Própria (2016)

Conforme descrito anteriormente, os dados para a construção da rosa dos ventos da **Figura 2** foram obtidos na estação meteorológica Aeroporto, no norte do município de Vitória, próxima à divisa com o município de Serra. Desta forma, utilizaremos esta informação como sendo extrapolada para as demais regiões de estudos. Na verdade, é uma metodologia bastante aplicável, visto que na RMGV as condições meteorológicas de direção e velocidade do vento são similares entre as diferentes estações.

### Descrição dos processos industriais e fontes de emissão

A presente seção apresenta de forma sucinta os processos industriais cujos resultados de dispersão serão abordados nos estudos de caso da Seção 3. Especificamente, serão descritas cada uma das fontes de poluição modeladas. É importante ressaltar que, em cada estudo de caso, é paralelamente avaliado um parâmetro de modelagem com efeitos importantes no resultado final, por exemplo, a influência de obstáculo ou a dispersão de compostos odorantes. Assim, as subseções seguintes apresentam, nos respectivos títulos, o tipo de fonte e o parâmetro de modelagem que será particularmente trabalhado neste caso. A Tabela 1 detalha estas informações com intuito de facilitar a leitura do artigo.

**Tabela 1** – Compilação dos casos testados na presente modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos

Fonte	Tipo de fonte	Poluentes modelados	Poluentes apresentados	Particularidade na modelagem
Indústria de Cerâmica	Pontual	PTS, CO e NO <sub>x</sub>	CO	Obstáculos e efeito de abaixamento da pluma
Indústria de Celulose e Papel	Pontual	NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Zona costeira e escolha de local de implantação de empreendimentos
Veículos	Área	COV, MP, CO e NO <sub>x</sub>	MP e CO	Emissões veiculares em fontes de área
Estação de	Área	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S	Dispersão de Compostos

Tratamento de  
Esgoto

Odorantes

Fonte: Autoria Própria (2016)

## Indústria de revestimentos cerâmicos e influência de obstáculos

Para a aplicação da modelagem de dispersão dos poluentes são necessários dados de entrada, como dados da fonte emissora, condições meteorológicas, topografia e da malha receptora. A localização das fontes de emissão foi definida de acordo com as coordenadas de uma fábrica de revestimentos cerâmicos, existente no município de Serra na RMGV, sendo esta fábrica dotada de três chaminés.

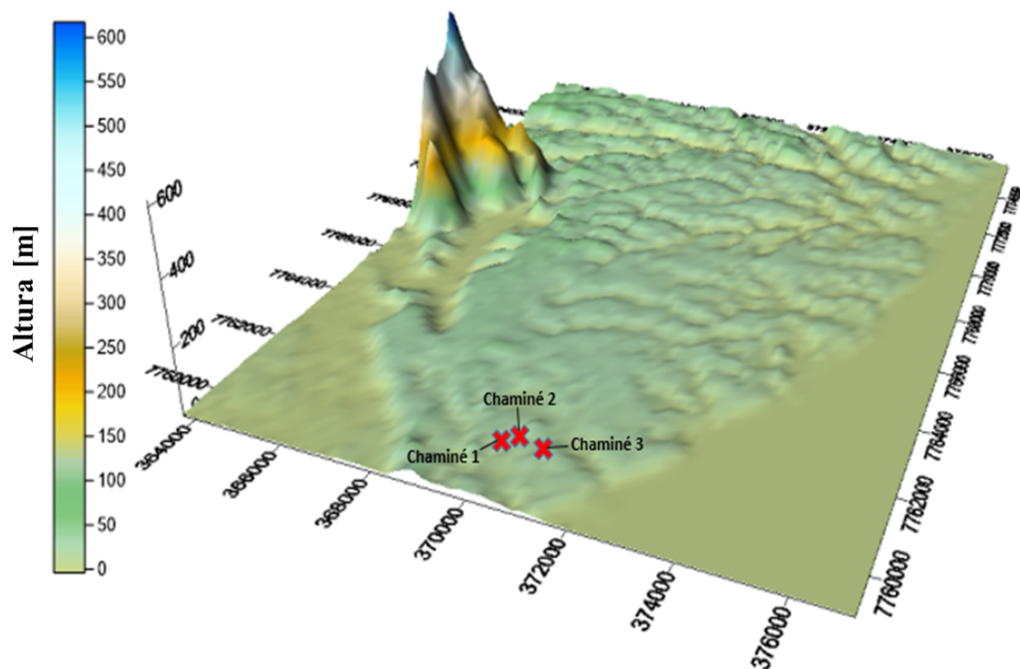
As taxas de emissão referentes a estas fontes foram obtidas através do Inventário de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória, desenvolvido em maio de 2011. Os principais poluentes identificados no inventário para as fontes simuladas são: PTS, CO e NO<sub>x</sub>. Além das taxas de emissão, obtiveram-se os diâmetros e alturas das fontes, além da temperatura e vazão de saída dos gases das mesmas. Para a aplicação do modelo, foi determinado um domínio de influência das fontes consideradas com área total de 246,23 km<sup>2</sup>, identificando as principais regiões passíveis de impactos oriundos da poluição atmosférica.

Os materiais cerâmicos consistem de sólidos inorgânicos não-metálicos que dispõem de alta temperatura para fabricação e uso. As cerâmicas mais comuns são compostas de óxidos, carbonetos e nitritos. Contextualizando as emissões atmosféricas, no processo produtivo tem-se que os principais poluentes oriundos do beneficiamento da matéria-prima cerâmica são materiais particulados, em especial aqueles com diâmetro inferior a 10µm, emitidos através de processos de britagem, moagem, triagem, classificação, manipulação, transporte e armazenamento. Além disso, os calcinadores são responsáveis por produtos de combustão tais como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e compostos orgânicos voláteis (COV). As emissões dos COV também estão associadas à combustão incompleta e volatilização do material orgânico da matéria prima, além de processos de mistura úmida (EPA, 1996).

O presente estudo lançará mão do modelo regulatório AERMOD acoplado ao PRIME para o estudo da influência de obstáculos próximos às fontes. Este é um algoritmo que considera os efeitos de rebaixamento da pluma (*downwash*) devido à proximidade de prédios. O modelo AERMOD-PRIME usa uma solução numérica das equações de conservação de massa, energia e momento e utiliza dados meteorológicos horários para estimar as concentrações médias em escalas de tempo, as quais vão desde uma hora até um ano (CAMARA, 2015; DOURADO et al, 2012).

A Figura 3 apresenta o modelo de elevação de terreno gerado para a topografia da área de estudo. Para investigar a influência de obstáculos no processo de dispersão de emissões atmosféricas a partir das fontes fixas, denominadas de chaminé 1, 2 e 3, inicialmente, realizou-se uma verificação dos parâmetros que influenciam nesse processo, como a altura dos prédios. Observa-se que a maior parte do domínio computacional é uma região plana. A Figura 4 mostra o posicionamento dos obstáculos em relação às fontes de emissão. Tratam-se de prédios já existentes na área de estudo cujas alturas reais serão modificadas de forma a verificar a possível interferência na emissão.

**Figura 3** - Topografia da região (parte do município de Serra) com a localização das fontes pontuais emissoras



Fonte: Autoria Própria (2016)

**Figura 4: Posicionamento dos obstáculos em relação às fontes de emissão**



Fonte: Adaptado de Google Earth (2016)

Para que o modelo pudesse captar os efeitos dos obstáculos na dispersão atmosférica, foi estabelecida uma malha receptora com área total de 211,72 km<sup>2</sup>, com um total de 5780 receptores, espaçados a cada 200 m longitudinal e transversalmente.

### **Fabricação de celulose e influência de regiões costeiras**

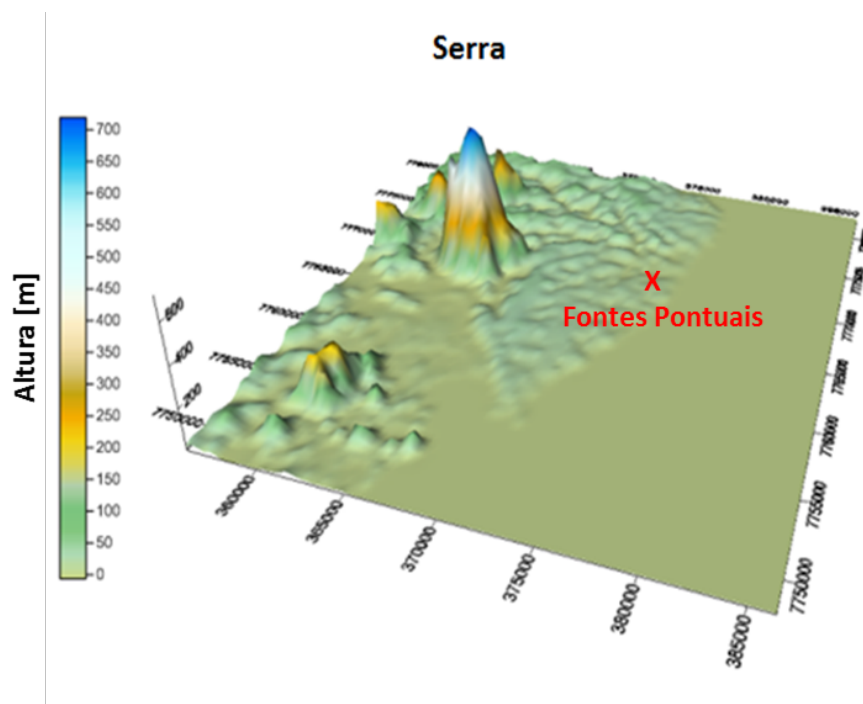
Para o estudo de fontes pontuais existentes em indústrias de fabricação de celulose, foi escolhida, de forma paralela, a influência de regiões costeiras e também a comparação entre duas regiões ao sul e ao norte da principal mancha urbana observada na RMGV. A Fonte 1 está localizada no município de Serra (ao norte de Vitória) e a Fonte 2 está localizada município de Vila Velha (ao sul de Vitória).

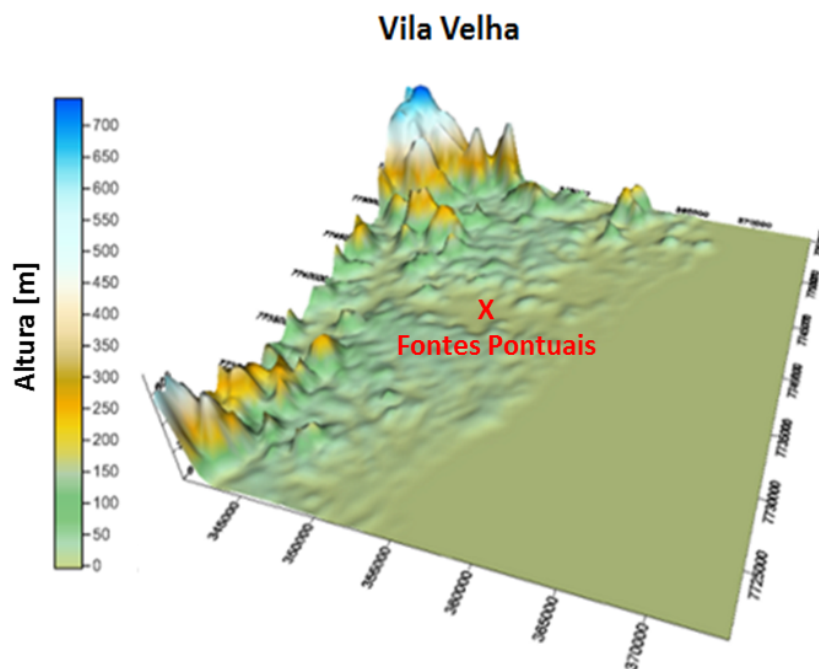
Para a aplicação do modelo, foi determinado um domínio de influência das fontes emissoras. Para o município de Serra, o domínio conta uma área total de 1.170,2 Km<sup>2</sup> e o município de Vila Velha

com 1.255,7 Km<sup>2</sup>. Após a definição do domínio, foi estabelecida a malha dos receptores. Para o município de Vila Velha, consideraram-se 4200 receptores espaçados a cada 500 metros em cada direção e, para o município da Serra, 3100 receptores, também espaçados em 500 metros.

A **Figura 5** apresenta o relevo de cada domínio em estudo, sendo que os dois municípios apresentam relevos com no máximo 700 metros de altitude. O município de Vila Velha apresenta elevações mais próximas da costa e que podem vir a ter grande influência na dispersão dos poluentes.

**Figura 5:** Modelo de elevação digital dos dois domínios de estudo para a implantação de uma usina de fabricação de celulose





Fonte: Autoria Própria (2016)

A modelagem de dispersão atmosférica foi realizada para uma indústria de grande porte de celulose de eucalipto. Considerou-se as emissões geradas pelas caldeiras de biomassa e de recuperação, sendo que nas caldeiras de recuperação ocorre a queima do licor negro, resultante do processo de cozimento, e a geração de vapor que movimenta as turbinas. Segundo Cardoso *et al.* (2000) o teor de enxofre presente no licor negro das indústrias brasileiras varia entre 3,6% e 4,4%, sendo o valor médio adotado para este estudo de caso igual a 3,7%.

As etapas do processo de fabricação da celulose consistem em produção do cavaco, cozimento, branqueamento, secagem e enfardamento, recuperação e utilidades (FAVARO, 2015). As principais emissões atmosféricas são provenientes dos processos de branqueamento, recuperação de produtos químicos, vaporação, caldeiras de recuperação e biomassa, forno de cal e secagem da polpa (MIRANDA, 2008).

Para a modelagem foram consideradas a implantação de duas indústrias de fabricação de celulose em regiões costeiras, com cinco caldeiras cada, sendo duas de biomassa e três de recuperação,

totalizando cinco chaminés em cada indústria. Para caldeiras de biomassa e nas caldeiras de recuperação foi considerada uma eficiência de tratamento dos gases emitidos aplicada em indústrias do mesmo porte e características.

Serão analisados os poluentes óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), que são gases com padrões de qualidades do ar estabelecidos pelo Decreto 3463, de 16 de dezembro de 2013 do Espírito Santo.

### **Emissões veiculares e fontes de linha**

O estudo de modelagem da dispersão de partículas emitidas devido ao fluxo de veículos será aplicado em parte do município de Vitória. Trata-se de uma primeira abordagem simplificada com o intuito de conhecer a resposta do modelo para esta aplicabilidade. Neste contexto, buscou-se avenidas de grande número de veículos circulando e uniformidade nesta informação, sendo elas a Av. Nossa Senhora da Penha, a Av. Leitão da Silva e a Av. Vitória.

O fator de emissão foi calculado segundo dados investigados e apresentados no primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários de 2011. Para isso, algumas adaptações foram feitas com o intuito de adequá-las à realidade de Vitória. Diante disso, buscou-se a quantidade de habitantes da cidade de Vitória, visto que este valor influencia nos dados de entrada da estimativa utilizando fatores de emissão. Segundo os dados do IBGE (2015), o município tem 355.875 habitantes. A partir disso pode-se estimar a distância média percorrida por viagem (em quilômetros), considerando também o modo de transporte utilizado, podendo ser transporte coletivo, individual ou não motorizado. Tratando-se de Vitória, a faixa de análise populacional, segundo o inventário, é de 250-500 mil habitantes e, concomitantemente a isso, o presente trabalho fará o diagnóstico quanto aos transportes individuais, portanto, adotou-se 5,7 km/viagem.

Os poluentes analisados na modelagem serão o Monóxido de carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), Hidrocarbonetos não-Metano (NMHC), Aldeídos (RCHO), Material Particulado (MP), que são, dentre os poluentes emitidos por veículos automotivos, os que são regulamentados pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que veio definir os



primeiros limites de emissão para veículos leves (CONAMA, 1986). Porém, com o intuito de otimizar a leitura, serão descritos no texto somente os resultados dos poluentes com maior impacto e proximidade aos padrões estabelecidos na legislação vigente.

Diante disso, têm-se os fatores de emissão de escapamentos, em g/km, por veículos movidos a gasolina e etanol hidratado de acordo com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores rodoviários de 2015 (BRASIL, MMA, 2015). O valor de 5,7 km/viagem será necessário para encontrar o fator de emissão em g/dia, de acordo com a Equação 2 a seguir.

$$\text{Taxa de Emissão [g/dia]} = \text{Fator de Emissão [g/km]} \times \text{Distância Percorrida por Dia [km/dia]} \quad (\text{Eq. 2})$$

Mas sabe-se que, em um dia, tem-se 86400 segundos, portanto pode ser feita a transformação do fator de emissão de g/dia para g/s. E, assim, é possível obter a taxa de emissão, como mostrado na Equação 3.

$$\text{Taxa de Emissão [g/dia]} = \text{Fator de Emissão [g/km]} \times 5,7 \text{ [km/dia]} \times (1/86400) \quad (\text{Eq. 3})$$

Além disso, ainda precisou-se obter a taxa em g/s.m<sup>2</sup>, sendo assim, os valores de taxa de emissão, considerando apenas veículos a gasolina comum, foram divididos pelas respectivas áreas de cada uma das três avenidas.

Outro dado que se deve avaliar é a estimativa da quantidade de veículos circulantes diariamente nas avenidas escolhidas no município de Vitória. De acordo com Ariane B. Timo e Frederico R. B. Cruz (2004), em estudo realizado sobre o fluxo de veículos, tem-se que a média de automóveis que circulam por hora por pista em avenidas de fluxo intenso, como no caso das três avenidas do estudo descritas anteriormente, é de 709,33. Considerando que nem em todas as horas do dia há uma movimentação significativa, multiplicou-se a média obtida por 19 horas, de forma a desconsiderar o pequeno fluxo que ocorre entre meia noite e cinco horas da manhã. Assim, obteve-se um valor

estimado médio de 13.477 veículos circulantes diariamente por pista. Sabe-se, contudo, que as avenidas Nossa Senhora da Penha, Leitão da Silva e Vitória possuem, respectivamente seis, quatro e seis pistas. Portanto, tem-se que o número médio estimado de veículos circulantes diariamente nas respectivas avenidas foi de 80.864, 53.909 e 80.864.

## **Volatilização de compostos odorantes e fontes de área**

O processo de tratamento por lagoas facultativas é muito simples e constitui-se unicamente por processos naturais. Estes podem ocorrer em três zonas da lagoa: zona anaeróbia, zona aeróbia e zona facultativa. O efluente entra por uma extremidade da lagoa e sai pela outra. Durante este caminho, que pode demorar vários dias (tempo de detenção hidráulico), o esgoto sofre os processos que irão resultar em sua purificação. Após a entrada do efluente na lagoa, a matéria orgânica em suspensão (DBO particulada) começa a sedimentar, formando o lodo de fundo. Este sofre tratamento anaeróbio na zona anaeróbia da lagoa. Já a matéria orgânica dissolvida (DBO solúvel) e a em suspensão de pequenas dimensões (DBO finamente particulada) permanecem dispersas na massa líquida. Estas sofrerão tratamento aeróbio nas zonas mais superficiais da lagoa (zona aeróbia). Nesta zona há necessidade da presença de oxigênio.

Este é fornecido por trocas gasosas da superfície líquida com a atmosfera e pela fotossíntese realizada pelas algas presentes, fundamentais ao processo. Para isso há necessidade de suficiente iluminação solar, portanto, estas lagoas devem ser implantadas em lugares de baixa nebulosidade e grande radiação solar. Na zona aeróbia, há um equilíbrio entre o consumo e a produção de oxigênio e gás carbônico. Enquanto as bactérias produzem gás carbônico e consomem oxigênio através da respiração, as algas produzem oxigênio e consomem gás carbônico na realização da fotossíntese.

Para exemplificar o estudo de caso representado por esta seção, foi escolhida a Estação de Tratamento de Esgoto de Camburi, localizada próxima à Praia de Camburi na capital capixaba. A escolha, dentre outros fatores, se baseou nas frequentes reclamações feitas pela população vizinha ao órgão ambiental competente. Segundo a Companhia de Saneamento do Espírito Santo, a lagoa de estabilização da Estação de Tratamento de Esgoto de Camburi atende aproximadamente 120.000

peças dos bairros da parte continental de Vitória (isto é, Pontal de Camburi, Jardim da Penha, Mata da Praia, República, Boa Vista, Morada de Camburi, Goiabeiras, Antônio Honório, Segurança do Lar, Solon Borges, Maria Ortiz, Jabour, Aeroporto e Jardim Camburi) e do bairro de Fátima, na Serra. A lagoa possui área total aproximada de 100.000 m<sup>2</sup> e nela são tratados 22 milhões de litros de esgoto diariamente a uma vazão volumétrica de 73 l/s.

Será simulada a dispersão de H<sub>2</sub>S emitido a partir de três lagoas de estabilização: uma lagoa que recebe o efluente de chegada e duas que realizam sedimentação primária. As lagoas são localizadas em ambiente urbano, e estão próximas a residências e outros empreendimentos. O domínio computacional foi escolhido de modo que as lagoas de estabilização da ETE, empreendimento de grande potencial de emissão de odores na região, ficassem no centro. A malha computacional possui 66 divisões na longitudinal e 60 divisões na transversal, resultando no número total de 3960 receptores.

Além de estabelecer o domínio a ser estudado para descrever as fontes de dispersão, foi ainda realizada a setorização desse domínio por haver diferenças em parâmetros como rugosidade, albedo e razão de Bowen, que são relacionados às categorias de uso e ocupação do solo. A Figura 6 mostra a visão de satélite do domínio computacional. As marcações indicam os diferentes setores observados a partir das características de uso e ocupação do solo. A presente setorização está sendo explicitada no texto por sua característica complexa em relação aos demais domínios. Aqui, 4 setores foram identificados.

**Figura 6** - Setorização do domínio proposto.



Fonte: Adaptada de Google Earth (2016)

As características dos diferentes setores são apresentadas por meio de três parâmetros: (i) razão de Bowen, que é o método matemático geralmente utilizado para calcular o calor perdido (ou ganho) de uma substância; é a razão de fluxos de energia de um estado para outro, de calor sensível e calor latente, respectivamente, (ii) albedo, que é a razão entre a quantidade de luz difundida ou refletida por uma superfície e a quantidade de luz incidente sobre a mesma, e (iii) rugosidade, que representa a morfologia geométrica da superfície, relacionada à altura dos elementos, como também, à forma e distribuição da densidade destes (OKE, 1996).

Uma parte muito importante do processo de modelagem da dispersão atmosférica de uma dada emissão é a sua correta quantificação. Vários parâmetros das fontes são definidos nessa etapa e, caso a importância de alguma dessas características seja menosprezada, a simulação apresentará uma grande chance de obter um resultado que não descreva corretamente a situação em questão (GOMES, 2012).

Parte dos dados da caracterização das fontes emissoras em questão foram obtidos no Plano Municipal de Saneamento Básico de Vitória – ES, e dados de aspectos geofísicos da região foram extraídos da ferramenta Google Earth, disponibilizado pela Google.

Em plantas de tratamento de esgoto, as emissões de odor podem ser influenciadas por diferentes fatores, como a composição do esgoto, os métodos e as condições do tratamento (como, por exemplo, temperatura, pH, tempo de retenção, etc). Sabendo que fatores de emissão permitem uma estimativa rápida e facilitada das emissões gerais produzidas por uma estação de tratamento de esgoto (CAPELLI et al, 2009), a expressão do cálculo de fator de emissão odorante (Equação 4) foi utilizada.

$$OEF = OER/C \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde OEF é o fator de emissão odorante expresso em  $\text{ou}_E \times \text{m}^{-3}$ , OER é a taxa de emissão em  $\text{ou}_E \times \text{dia}^{-1}$  e C é a vazão nominal em  $\text{m}^3 \times \text{dia}^{-1}$ . Portanto, OEF representa a quantidade de odor emitida relacionada ao volume de esgoto, logo é expressa em unidades odorantes (ou) por metros cúbicos de esgoto tratado. Sabendo dos valores de OEF para a fase de chegada e fase de sedimentação primária, e a capacidade nominal de 472 l/s (PMV/SEMOB, 2013), podemos calcular o valor de OER.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta os resultados de modelagem para as quatro situações caracterizadas na descrição dos processos industriais e fontes de emissão. Vale ressaltar que cada estudo de caso foi escolhido de forma a fomentar discussões interessantes acerca da poluição atmosférica em ambientes urbanos. É importante também destacar que não é escopo do estudo apresentar a modelagem da dispersão de todas as fontes consideradas nos inventários de emissão. Na realidade, o que se busca é investigar casos reais e potenciais e as respectivas influências topográficas ou meteorológicas que podem acontecer.

## Influência da presença de obstáculos na emissão de poluentes gasosos e particulados emitidos de fontes pontuais

Para cada poluente selecionado (PTS, CO e NO<sub>x</sub>), o processo de dispersão para domínio de influência delimitado foi simulado, sendo as emissões provenientes de três fontes pontuais (Chaminé 1, Chaminé 2 e Chaminé 3) em três cenários distintos, sendo eles: (1) sem a presença de obstáculos; (2) com a presença de obstáculos com altura H<sub>1</sub> = 30 m e (3) com a presença de obstáculos com H<sub>2</sub>= 60m. Para efeitos de comparação com o Decreto nº 3463-R, os poluentes foram simulados para médias de 24h para PTS; de uma hora e oito horas para CO e de uma hora e um ano para NO<sub>x</sub>.

A Figura 7(a), a Figura 7(b) e a Figura 7(c) mostram os resultados das simulações para dispersão das emissões de CO, considerando as concentrações máximas da média de 8 horas, com e sem a presença de obstáculos, medidas no solo. Todas as demais situações apresentadas na Tabela 2 foram simuladas, porém somente um dos casos foi apresentado para possibilitar discussões sobre o efeito de obstáculos na pluma média de poluentes. Para efeito de entendimento, as plumas de PTS e NO<sub>x</sub> resultaram no mesmo comportamento que as plumas de CO apresentadas nas Figuras 7.

Para todos os cenários estudados, as concentrações médias de 8 horas de CO não ultrapassaram o limite do padrão final estabelecido no Decreto 3463-R (10.000 µg/m<sup>3</sup>), ficando abaixo de 50 µg/m<sup>3</sup>, para o pior cenário, com presença de prédios de altura H<sub>2</sub> (Figura 7(c)), sendo que as maiores concentrações de CO se revelaram próximas às fontes emissoras, diminuindo à medida que as emissões se afastavam das mesmas. Esta fonte representa uma dentre as muitas que compõem o inventário da RMGV, mas a sua análise individual é de suma importância na avaliação dos cenários com e sem obstáculos.

**Tabela 2** – Padrões Finais inseridos no Decreto Estadual 3463-R

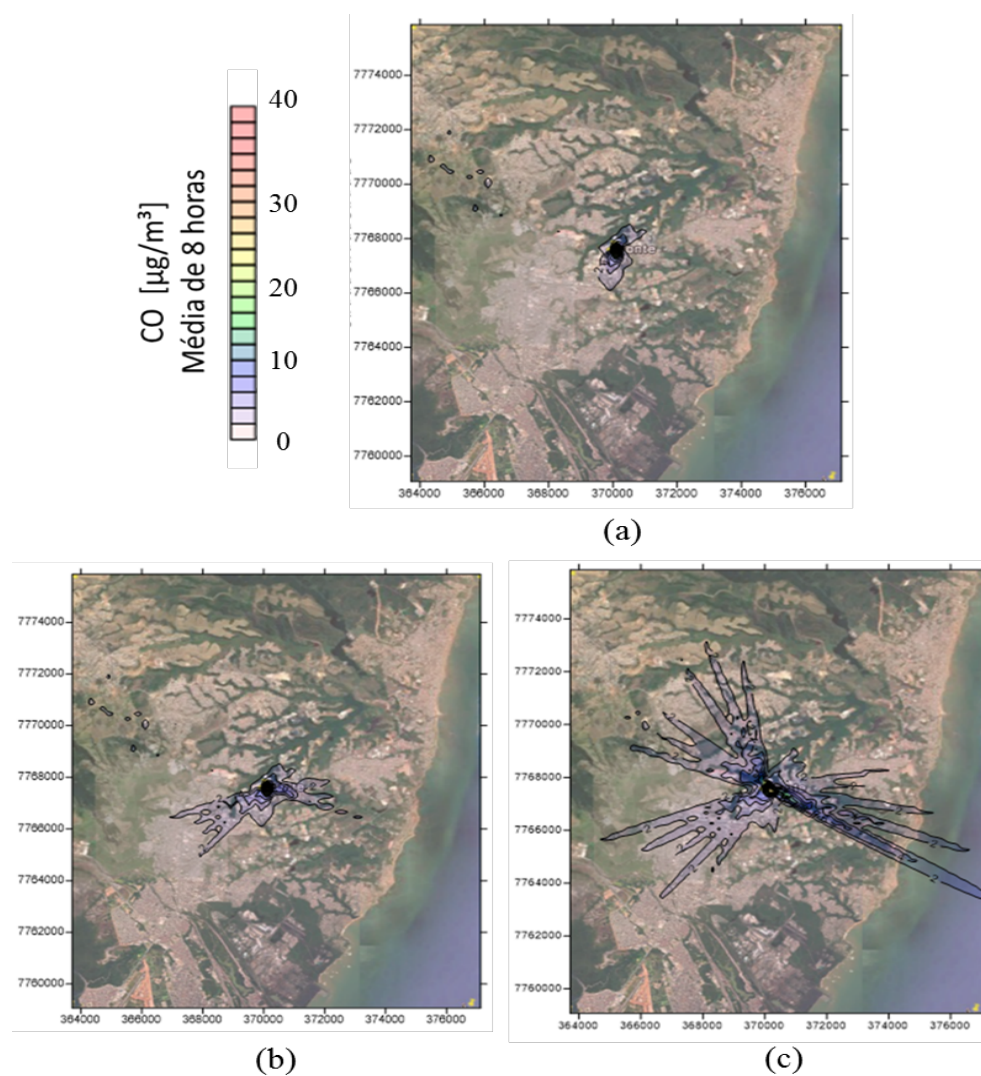
PTS (24h)	CO (1h)	CO (8h)	NO <sub>x</sub> (1h)*	NO <sub>x</sub> (ano)*
180 µg/m <sup>3</sup>	30.000 µg/m <sup>3</sup>	10.000 µg/m <sup>3</sup>	240 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>

\*expresso em NO<sub>2</sub>.

Fonte: Autoria própria (2016)

Comparativamente ao caso onde foram calculadas médias de 1 hora, para as concentrações máximas de 8h de CO, a pluma de poluentes se expandiu para uma área significativamente menor, de maneira que, para a dispersão de CO, os impactos a curto prazo são mais significativos que a longo prazo.

**Figura 7** - Máximas concentrações da média de 8 horas de CO: (a) sem obstáculos, (b) obstáculos com 30 metros de altura e (c) obstáculos com 60 metros de altura.



Fonte: Autoria Própria (2016)

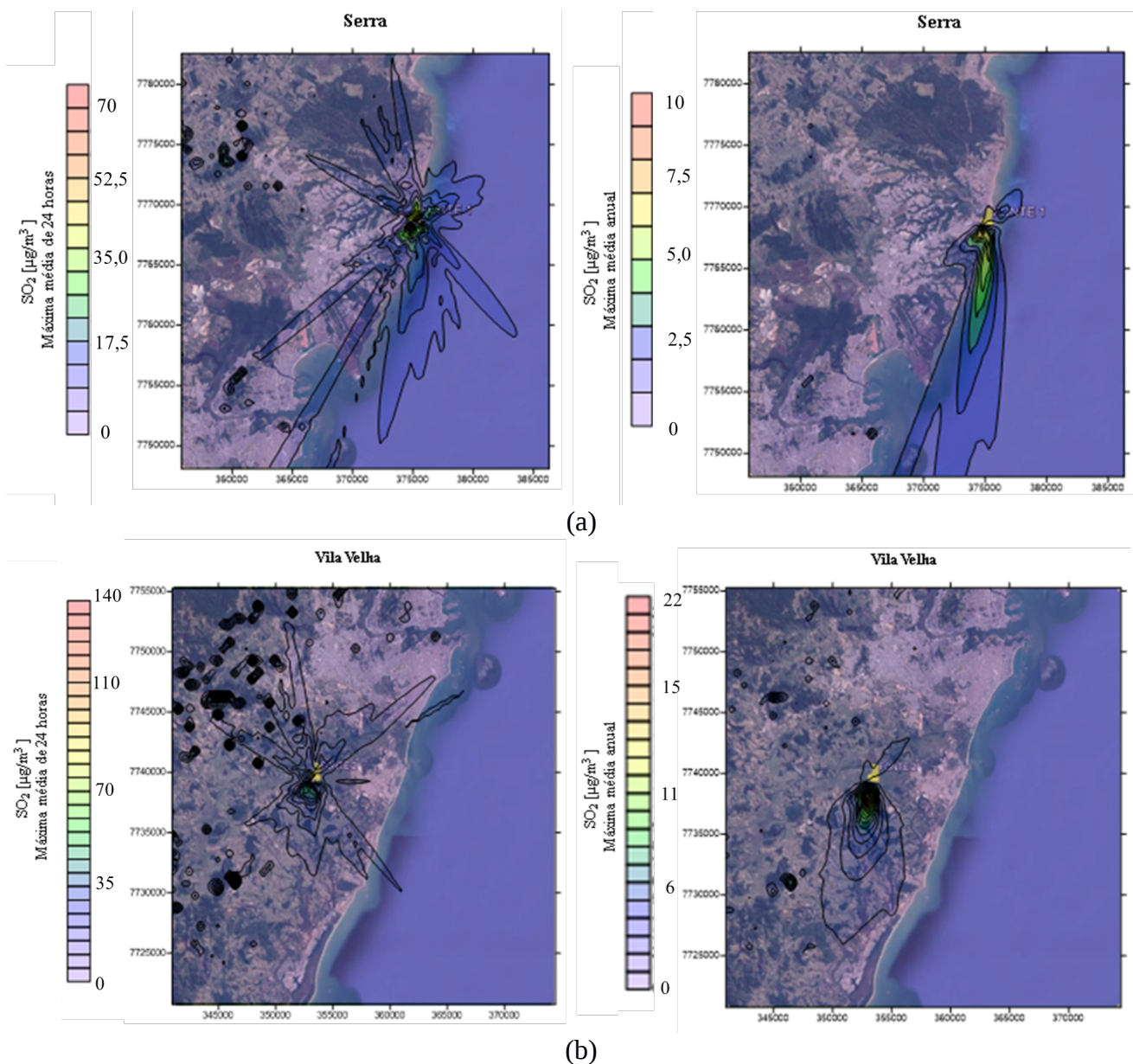
Na Figura 7(a), nota-se que a dispersão segue o padrão dos ventos, no sentido sul, havendo também dispersão a nordeste. Na Figura 7(b) e Figura 7(c), com presença de obstáculos, observa-se que as plumas de concentração do poluente alcançam uma extensão em área significativamente maior que para a situação sem obstáculos, principalmente nas direções dos obstáculos, revelando que houve influência dos mesmos. É sabido (CAMARA, 2015; DOURADO et al, 2012) que a principal influência de obstáculos nas plumas de poluentes é o seu abaixamento, ou seja, concentrações mais elevadas que somente seriam observadas após a costa (no oceano) são notificadas bem próximas à fonte e mesmo na área urbana que circunda a unidade industrial. Como em todo o bairro onde está instalada a unidade industrial é composta por chaminés, sugere-se a não implantação de novas edificações de altitudes elevadas acima de 20 metros, na sua vizinhança.

### **Fabricação de celulose e influência de regiões costeiras**

A Figura 8(a) e a Figura 8(b) demonstram, através dos mapas de isolinhas, as concentrações do SO<sub>2</sub> para cada período estudado em 2015, para os municípios de Serra e Vila Velha. Os gráficos apresentam as máximas médias de concentração de SO<sub>2</sub> de 24 horas e anual para cada fonte em estudo.



**Figura 8** - Modelagem da fonte pontual representando a fábrica de celulose e papel: (a) Máxima média de 24 horas e máxima média anual da concentração de SO<sub>2</sub> em Serra e (b) Máxima média de 24 horas e máxima média anual da concentração de SO<sub>2</sub> em Vila Velha.



Fonte: Autoria Própria (2016)

Verificando a contribuição de cada fonte, é possível observar que a concentração de SO<sub>2</sub> foi mais acentuada no município de Vila Velha, quando comparada ao município da Serra, tanto para máxima concentração média de um dia, quanto para anual, e isso se deve à predominância dos ventos na direção nordeste e ao fato de a fonte do município de Serra estar mais próxima à costa.

A legislação estadual apresentou três metas intermediárias (MI), a meta intermediária 1, meta intermediária 2 e meta intermediária 3, bem como um padrão final (PF) para cada poluente de interesse, sendo que a meta intermediária MI1 é o valor referencial legal a partir de dezembro de 2013 e que será considerado para avaliação nesse estudo. O Decreto 3463/2013 estabelece que a meta intermediária 1, para as concentrações médias de 24 horas e anuais para o SO<sub>2</sub> são, respectivamente, 60 µg/m<sup>3</sup> e 40 µg/m<sup>3</sup>.

Analisando as isolinhas de concentração, verificou-se que o poluente SO<sub>2</sub> ultrapassou o limite para máxima média de 24 horas, tanto no município da Serra, quanto no de Vila Velha, alcançando valores de 70 µg/m<sup>3</sup> e 135 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Em Vila Velha, o valor excedeu em 225% o limite. Para a máxima média de 1 dia e máxima média anual, verificou-se que houve uma concentração acentuada em alguns pontos no município de Vila Velha. Isso se deve ao fato de a região ser mais montanhosa, ocasionando um aprisionamento desses poluentes nas proximidades dos relevos. Os valores encontrados para as máximas médias anuais dos poluentes SO<sub>2</sub> não ultrapassaram o valor permitido segundo o decreto.

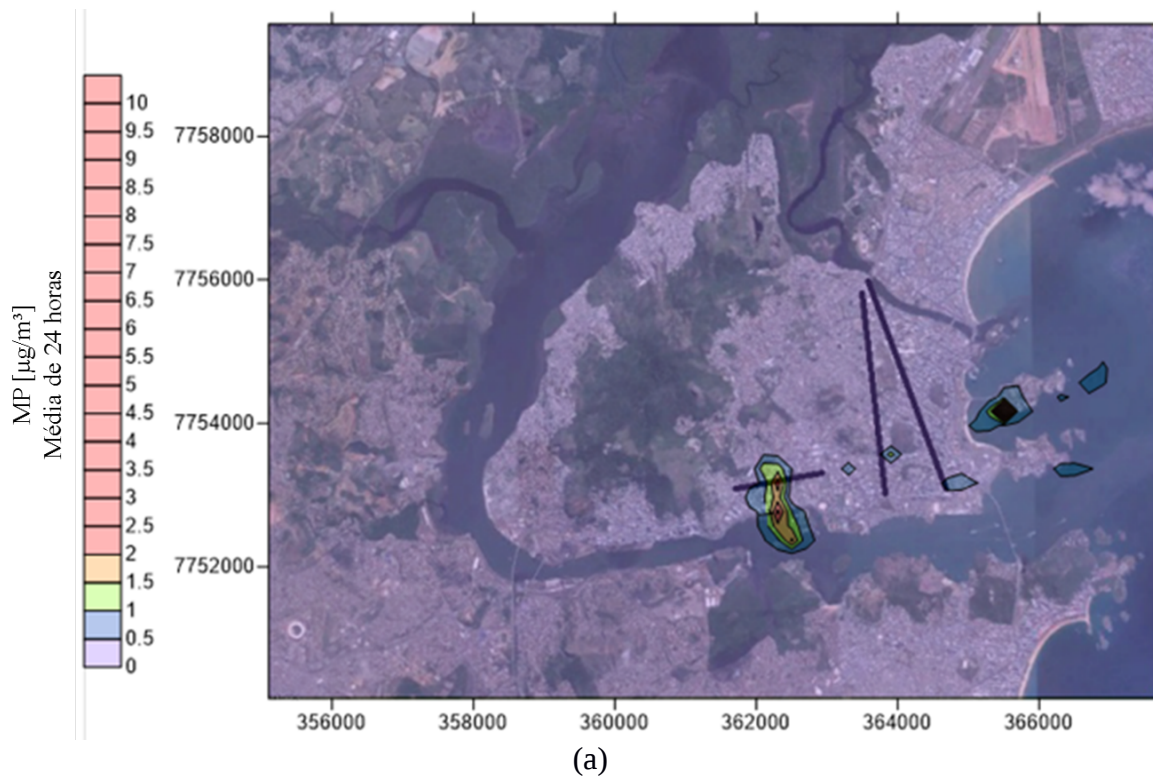
## **Emissões veiculares e fontes de área**

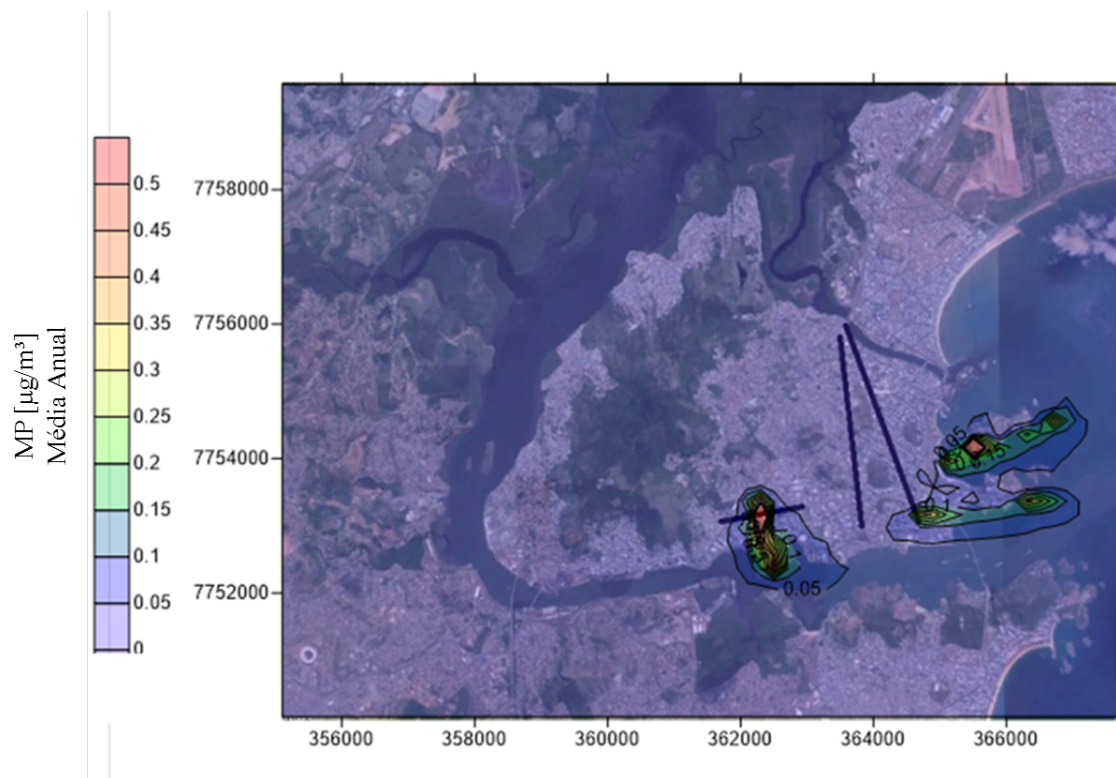
Tendo como base o Decreto N° 3463-R de 16 de dezembro de 2013, do Estado do Espírito Santo, buscou-se avaliar o atendimento aos padrões de qualidade nele estabelecidos. O decreto supracitado é a legislação vigente de padrões de qualidade do ar no Espírito Santo.

Trata-se de uma revisão detalhada, e principalmente, de uma atualização da resolução CONAMA n° 03, de 1990. Para isso, foram utilizados os dados simulados referentes aos poluentes que foram regulamentados pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

(descritos na seção de metodologia) e os contemplados no Decreto, concomitantemente. Os resultados estão descritos na Figura 9 e na Figura 10. Vale ressaltar que, da mesma forma como foram apresentados os resultados nas seções anteriores, os poluentes que apresentaram resultados de concentração mais próximos dos padrões foram inseridos nas discussões do presente artigo.

**Figura 9** - Concentrações de material particulado total emitidos a partir de veículos em três avenidas de grande circulação no município de Vitória: (a) média de 24 horas e (b) média anual.





(b)

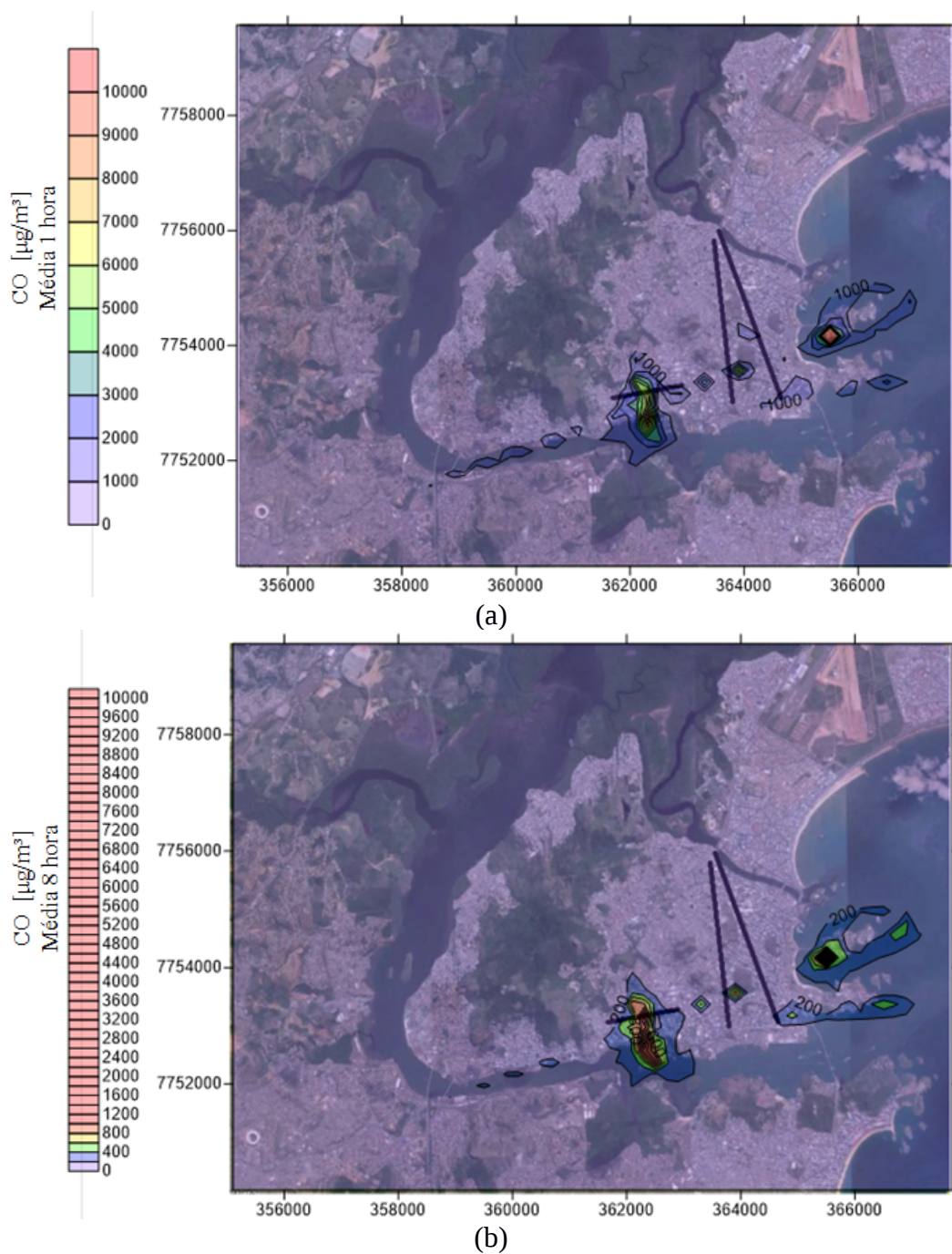
Fonte: Autoria Própria (2016)

Na **Figura 9**, nas concentrações médias de 24 horas para o material particulado, pode-se perceber que as maiores concentrações ficaram abaixo da estabelecida pelo Decreto –  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  –, alcançando maiores valores em torno da Avenida Vitória e na Ilha do Frade, uma elevação que ocorre nas proximidades das fontes. O pico de concentração mostrado da Ilha está provavelmente relacionado à topografia mais elevada do local. No gráfico de material particulado de concentração de média anual, foram observadas maiores concentrações também na Ilha do Boi, porém ainda abaixo do limite de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A concentração média de uma hora para o monóxido de carbono apresentou valor próximo a 10000 microgramas por metro cúbico nas proximidades da Ilha do Frade, sendo o padrão 30000 microgramas por metro cúbico. Aparentemente, a Avenida Vitória mostrou maior contribuição novamente em termos de concentração do poluente.

Para a concentração média de oito horas de monóxido de carbono, o padrão estabelecido pelo Decreto é de  $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dessa forma, a situação se torna preocupante, de acordo com o gráfico, visto que em algumas localidades foram atingidas concentrações muito próximas do limite.

**Figura 10** - Concentrações de CO emitido a partir de veículos em três avenidas de grande circulação no município de Vitória: (a) máxima média de 1 hora e (b) máxima média de 8 horas



Fonte: Autoria Própria (2016)

## Volatilização de compostos odorantes e fontes de área

Processados os dados de entrada no AERMOD, obtivemos os arquivos de saída com informações sobre as concentrações em médias de 1, 8 e 24h, além da média anual para cada receptor. Porém, tratando-se de sulfeto de hidrogênio, foram analisadas as médias de períodos de 15 minutos, realizando-se a conversão a partir das médias de uma hora. Para realizar a conversão, os dados de concentrações ( $C_m$ ) gerados no AERMOD foram compilados e convertidos com a Equação 5 (DOURADO et al., 2012):

$$(C_p/C_m) = (t_0/t)^{0,2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$C_p$  = concentração no tempo  $t_0$ ;

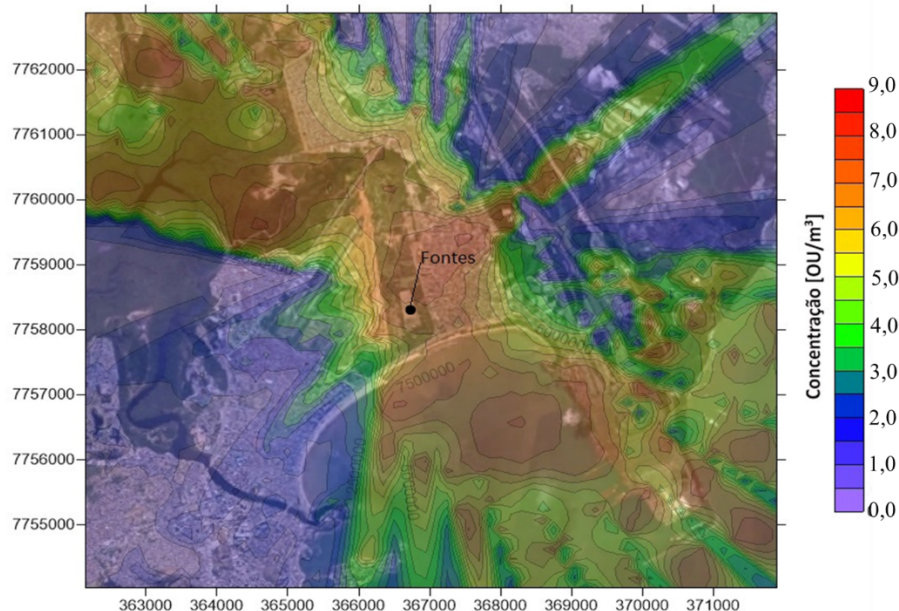
$t_0$  = tempo que se quer estabelecer a concentração (0,2h);

$C_m$  = concentração na média de uma hora;

$t$  = tempo referente à concentração média utilizada (1h).

Com arquivos devidamente convertidos para as médias desejadas, foi utilizado um software de criação de distribuições de concentração, que gerou plumas de concentração que permitiram analisar graficamente a relação entre o domínio computacional e a dispersão do poluente pela fonte estabelecida. A **Figura 11** representa a pluma gerada para médias de concentrações de 15 minutos (ou  $m^{-3}$ ).

**Figura 11** - Concentração de gás odorante (sulfeto de hidrogênio) em unidades de odor por metro cúbico.



Fonte: Autoria Própria (2016)

Sabendo que concentrações de odor excedentes a  $5 \text{ ou.m}^{-3}$  são facilmente notadas pela maior parte das pessoas, independentemente do tipo de odor, podemos notar que o valor da concentração do limiar de percepção é superado em boa parte do domínio computacional. Este resultado pode ser validado por observações em campo na região. Os autores efetuaram sucessivas campanhas de acompanhamento do reconhecimento do odor na região. Em aproximadamente 78% das campanhas foi percebido o odor do gás sulfídrico.

É válido pontuar que o odor seria consideravelmente diminuído se os aeradores da lagoa estivessem funcionando, pois assim haveria uma maior atividade das bactérias aeróbias em degradar a matéria orgânica sem liberar o gás sulfeto de hidrogênio.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao atendimento aos padrões de qualidade do ar, preconizados pelo Decreto nº 3463-R de 2013, alguns dos resultados de concentração resultados das modelagens ultrapassaram os limites estabelecidos, apresentando valores bastante superiores, o que indica que os efeitos da poluição



atmosférica proveniente de veículos e unidades industriais, de forma geral, não devem ser desmerecidos na Grande Vitória, mas ao contrário, deve-se ter maior prudência em relação a isso, uma vez que a maioria desses poluentes têm efeitos adversos à saúde da população.

A investigação da influência de presença de obstáculos resultou em conclusões interessantes. Ao analisar a dispersão dos poluentes sem a presença de obstáculos, observa-se que os mesmos seguem preferencialmente a direção dos ventos predominantes na região de estudo, com exceção das modelagens de máxima média horária de CO e NO<sub>x</sub>, o que evidencia que os impactos das emissões da fábrica de cerâmicas a curto prazo são mais significativos que a longo prazo.

A presença de obstáculos gera um aumento na área de influência da pluma de poluentes, causando impactos na qualidade do ar, pois eles servem como barreira à dispersão de poluentes, aumentando a concentração destes em áreas que não sofreriam os efeitos da poluição, se a topografia do terreno permanecesse inalterada.

Tendo em vista os gráficos de concentração dos poluentes analisados, pode-se verificar que a dispersão está sob influência do sentido do vento e da topografia de Vitória, que possui direção predominantemente norte, visto que os maiores valores foram obtidos em locais de topografia mais elevada localizados ao sul da ilha, sendo influenciada pelo vento norte.

A comparação entre a instalação de uma usina de celulose na porção norte ou sul da RMGV analisou a dispersão do poluente SO<sub>2</sub> para duas fontes através do modelo regulatório AERMOD. As análises foram feitas considerando uma fonte em Vila Velha e outra na Serra. Como parâmetro de análise, utilizaram-se as metas intermediárias 1 do Decreto 3463/2013, que prevê as concentrações médias de 24 horas e anuais para o SO<sub>2</sub>.

Os trabalhos de mapeamento demonstraram que existe uma direção predominante na propagação das plumas de contaminação provenientes da direção Norte-Nordeste. Das fontes analisadas, a que apresentou melhores condições de dispersão com base nos parâmetros estudados (médias anuais e máximas diárias) foi a Fonte 1, localizada na Serra. Assim, através do estudo, foi possível determinar que a fonte localizada no município de Vila Velha possui maior impacto sobre a qualidade do ar, uma vez que todas as concentrações encontradas se mostraram, significativamente,

superiores à Fonte 1. Por fim, avaliando os impactos futuros, caso ocorra a instalação das fontes, é mais viável a implantação de uma indústria de grande porte de celulose do eucalipto no município da Serra, visto que as condições meteorológicas de tal município são mais propícias para a dispersão dos poluentes em estudo.

Cabe ressaltar que é necessário manter ou aumentar a eficiência de remoção de poluentes das indústrias, haja vista que o limite de concentração foi excedido em valores extremamente preocupantes, podendo causar sérios prejuízos à saúde humana, aos ecossistemas, ao patrimônio cultural, assim como ao clima.

A investigação das emissões veiculares e sua dispersão compôs um dos tipos de fonte analisados e levantou uma série de questionamentos que surgem sempre que se deve trabalhar com este tipo de fonte. Primeiramente, o cálculo e a aplicação dos fatores de emissão devem seguir uma metodologia bem embasada, de forma a identificar os valores de emissão de vias. Por se tratar de um estudo de caso onde o principal objetivo era a compreensão dos fenômenos envolvidos na emissão e a aplicação disto no modelo utilizado, uma parte das principais avenidas do município de Vitória foi utilizada. As concentrações observadas para o monóxido de carbono foram bastante elevadas, o que pode ser explicado pelos seguintes fatores: (i) mal dimensionamento dos fatores de emissão, (ii) erros associados à modelagem de fontes de linha. O presente estudo fez a análise de apenas três avenidas, o efeito cumulativo de todas as vias de Vitória será muito mais impactante, havendo então a necessidade de estudos mais aprofundados relacionados ao tráfego de veículos na cidade de Vitória. Com base nestes estudos será possível estabelecer políticas públicas relacionadas à poluição atmosférica.

A investigação da emissão de odor (sulfeto de hidrogênio) a partir de lagoas de estabilização de uma estação de tratamento de esgoto finalizou as discussões dos estudos de caso, inserindo questionamentos em uma problemática bastante levantada pela sociedade na RMGV. A primeira dificuldade se dá no estabelecimento do fator de emissão. Após revisão da literatura sobre o tema, foi possível identificar o fator de emissão mais utilizado pelos pesquisadores da área. Diferentemente do que ocorre com os demais estudos de caso, a poluição por compostos odorantes não é regulamentada pelos órgãos ambientais competentes: o seu efeito prejudicial à saúde não é necessariamente direto

como os demais poluentes, mas ocorre por meio do incômodo. O tempo de média também é diferenciado, de forma a levar em consideração picos que ocorrem durante um dia, chamado de limite de percepção de odor. Uma grande parte da vizinhança das lagoas de estabilização sofre frequentemente com o odor da estação, o que foi comprovado pela distribuição de concentração apresentada no presente artigo.

De forma paralela a todos os resultados práticos apresentados até o momento, o presente artigo possui uma interessante contribuição quanto à participação de professores e alunos na aplicação de uma metodologia de modelagem matemática em sala de aula. Foram formados pensadores na problemática da poluição atmosférica em ambientes urbanos, além de profissionais habilitados à aplicação desta ferramenta no mercado de trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABIMEQ. Solução técnica: Revestimento Cerâmico Branco. 2009. Disponível em: <http://www.datamaq.org.br/sebrae/Article.aspx?entityId=52d3edaf-aafe-dd11-8989-0003ffd062a1>. Acesso em: 01 jun 2016.

AMARAL, D. M.; PIUBELI, F. A. A poluição atmosférica interferindo na qualidade de vida da sociedade. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 5., 2003, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: UNESP, 2003. Disponível em: [http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo\\_24.pdf](http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_24.pdf). Acesso em: 01 jun 2016.

ARAÚJO, I. R. S. **Simulação da dispersão de poluentes atmosféricos e avaliação da qualidade do ar na área de abrangência do Distrito Industrial de Barbacarena-PA**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais). Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém. 2012.

AUBRUN, S.; LEITL, B.. Development of an improved physical modeling of a forest area in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, v.38, p. 2797–2801, 2004

BARBON, A.; GOMES, J. Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com uso do modelo AERMOD. **Eng Sanit Ambient**, v.15, n.2, p.129-140, 2010.

BARRETO, A. A.; ALBERTO, F. L. A; RODRIGUES, P. C. H. Análise do processo de dispersão de emissões atmosféricas visando a escolha da posição de uma fonte emissora – Estudo de caso. In:

CONGRESO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010. Disponível em: < [http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/164\\_34989.pdf](http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/164_34989.pdf)>. Acesso em: 03 jun 2016.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Inventário Nacional De Emissões Atmosféricas Por Veículos Automotores Rodoviários, 2015.

CAMARA, V.F. **Avaliação da efetividade dos limites de concentração de emissão de poluentes atmosféricos da indústria cerâmica na proteção da qualidade do ar.** 2015. 163 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis. 2015.

CAPELLI L., SIRONI S., DEL ROSSO R., CÉNTOLA P., 2009a, Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors, **Water Res.** 43, 1977-1985.

CARDOSO, Lúcio. SIMÕES, Márcia Regina. WOLFF, Fred. Propriedades Térmicas do Licor Negro de Processo Kraft. **CIADICYP** (2000).

CASTRO, H. A. et al. Air pollution and respiratory diseases in the Municipality of Vitória, Espírito Santo State, Brazil. **Cad. Saúde Pública**, V. 23, n. 4, p. S630-642, 2007.

DEMUNER, J. C. D.; PAULA, R. R. C. Simulação física do escoamento atmosférico ao redor de um obstáculo de geometria complexa. In Jornada de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 6, 2011, Vitória. **Anais eletrônicos...** Vitória: Ifes, 2011. Disponível em: <[http://www.cefetes.br/pse/prppg/pesquisa/jornadas/jornada\\_2010\\_2011/anais/045\\_anais\\_do\\_evento\\_arquivos/..%5CT2628.pdf](http://www.cefetes.br/pse/prppg/pesquisa/jornadas/jornada_2010_2011/anais/045_anais_do_evento_arquivos/..%5CT2628.pdf)>. Acesso em: 03 jun 2016.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **AERMOD**: Description of model formulation. EPA-454/R-03-002. 2004. 91 p., 2004.

DOURADO. H. et al. The Effects of Atmospheric Turbulence on Peak-to-Mean Concentration Ratio and its Consequence on the Odour Impact Assessment Using Dispersion Models. **Chemical Engineering Transactions**, vol. 30, 2012.

FAVARO, J. S. C., Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de eucalyptus grandis x eucalyptus urophylla, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

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

FREITAS, C. U. et al. Poluição do ar e impactos na saúde em Vitória, Espírito Santo. **Rev. Saúde Pública**, vol. 4, n. 4, 2016.

GOMES, E. L. M.; BIASUTTI, S. **Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES**. 2012. 146 F. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Ambiental, Vitória. 2012.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA; ECOSOFT. **Inventário de Emissões Atmosféricas da Região da Grande Vitória**. Acordo de Cooperação Técnica IEMA-ECOSOFT RTC10131-R1. 2011. 48p. Disponível em: <[http://www.meioambiente.es.gov.br/download/RTC10131\\_R1.pdf](http://www.meioambiente.es.gov.br/download/RTC10131_R1.pdf)>. Acesso em: 03 jun 2016.

KAWANO, M. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos**. 2003. 121 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis. 2003.

MAVROIDIS I., GRIFFITHS R.F., HALL D.J. Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles. **Atmospheric Environment**, V. 37, p. 2903-2918, 2003.

MELO, S. M. et al. Simulação física do transporte de poluentes atmosféricos em áreas urbanas com uma fonte pontual localizada no telhado. In: CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 4, 2014 Chaco. **Anales...** Chaco: Editorial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, 2014.

MELO, M. M. Correlação entre percepção do incômodo e exposição ao material particulado presente na atmosfera e sedimentado. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

MINGUILLÓN, M. C.; MONFORT, E.; QUEROL, X.; ALASTUEY, A.; CELADES, I.; MIRÓ, J. V. Effect of ceramic industrial particulate emission control on key components of ambient PM<sub>10</sub>. **Journal of Environmental Management**, V. 90, n. 8, p. 2558-2567, 2009.

MIRANDA, R. E. S., Impactos ambientais decorrentes dos resíduos gerados na produção de papel e celulose, Monografia de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 46 e 47. p. 21-36, 1993.

PAULA, R. R. C.; SANTOS, J. M.; REISEN, V. A. Modelagem estocástica das flutuações turbulentas de concentração de poluentes atmosféricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 9, 2002. Caxambu. **Anais eletrônicos** Caxambu: Encit, 2002. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2002/Paper-title/22/CIT02-0522.PDF>>. Acesso em: 28 jun 2016.

PMV, Prefeitura Municipal de Vitória, Secretaria Municipal de Obras, Plano Municipal de Saneamento Básico, 2013.

PRINCEVAC M. et al. Lateral channeling within rectangular arrays of cubical obstacles, **J.Wind Engineering Aerodynamics**, V. 98, p. 337-385, 2010.

SADA, K.; SATO, A. Numerical calculation of flow and stack-gas concentration fluctuation around a cubical building. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 35, p. 5527, 2002.

SANTOS, A. R.; VAREJÃO, A. S.; SILVA, K. G. Modelagem do impacto da ampliação da avenida Fernando Ferrari (Vitória- ES) na qualidade do ar em sua redondeza. **Soc. & Nat.**, V. 23, n. 2, p. 249-262, 2011.

SILVA L. M.; A. R.; GAGNO, Z. C.; JESUS, G. A. Níveis de Ozônio Troposférico na Cidade de Vitória, Espírito Santo, Brasil. **Vértices**, V. 10, n. 1, p. 153-164, 2008.

SILVA, T. B.; BARRETO NETO, A. A. Modelagem da dispersão dos poluentes atmosféricos na Região Metropolitana da Grande Vitória. In Jornada de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 4, 2009, Vitória. **Anais eletrônicos...** Vitória: Ifes, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/hq61fU>>. Acesso em: 03 jun 2016.

TIMO, A., CRUZ, F. Análise estocástica do fluxo de veículos. Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. 2004.

ZURITA, M. L. L.; TOLFO, A. M. **A qualidade do ar em Porto Alegre**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. 103 p.