

Trabalho de Conclusão de Curso

Simulação das Emissões Atmosféricas de
uma Lavra de Minério Utilizando o AERMOD

Lara Piluski Santini

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Lara Piluski Santini

**SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE UMA LAVRA DE MINÉRIO
UTILIZANDO O AERMOD**

Florianópolis

2019

Lara Piluski Santini

**SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE UMA LAVRA DE MINÉRIO
UTILIZANDO O AERMOD**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro
Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Prof. Leonardo Hoinaski Dr.

Florianópolis

2019

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

Santini, Lara

Simulação das Emissões Atmosféricas de uma Lavra de
Minério Utilizando o AERMOD / Lara Santini ; orientador, Leonardo Hoinaski,
2019.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

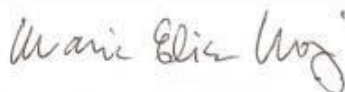
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. I. Hoinaski, Leonardo . II.
Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Lara Piluski Santini

**SIMULAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE UMA LAVRA DE MINÉRIO
UTILIZANDO O AERMOD**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira Sanitarista e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 02 de dezembro de 2019.

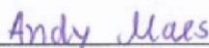


Prof.^a Maria Elisa Magri Dra.
Coordenadora do Curso

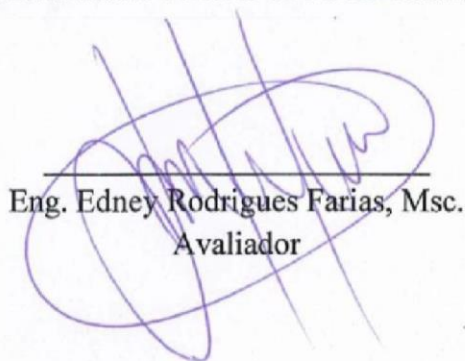
Banca Examinadora:



Prof. Leonardo Hoinaski Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Andy Maes, Msc.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Edney Rodrigues Farias, Msc.
Avaliador

Este trabalho é dedicado a minha querida mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor orientador Leonardo Hoinaski pela ajuda prestada neste trabalho, e pelos conhecimentos transmitidos que despertaram em mim o interesse e gosto pela área de qualidade do ar.

A todos os professores da UFSC por todo o conhecimento repassado durante as aulas, os quais contribuíram formidavelmente na minha formação.

A todos do laboratório LCQAr por toda simpatia, ajuda e receptividade durante as minhas idas no laboratório.

A minha mãe Maria Elisabete Piluski que sempre me apoiou e ajudou na minha formação, e sempre me incentivou nos meus estudos, com a preocupação de eu me tornar uma boa profissional.

Ao chefe Edney Rodrigues de Farias pela oportunidade de estágio, o qual contribuiu com o meu aprendizado e crescimento profissional, assim como pela sugestão do tema deste trabalho e estrutura fornecida para a sua elaboração.

A todos os meus colegas de trabalho da ENGERA pelas trocas de conhecimento diárias, por todo apoio e paciência e pela alegria que transmitem.

Aos meus amigos e colegas da turma 13.1 por todos esses anos de amizade e parceria, e por estarem sempre presentes em diversos momentos da minha vida.

“Whatever you are be a good one”

(Abraham Lincoln)

RESUMO

As pedreiras constituem uma fonte de poluição atmosférica, visto que ocorrem emissões de poluentes durante suas principais atividades. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto na qualidade do ar devido às emissões da atividade industrial de uma pedreira, utilizando o modelo AERMOD da USEPA (Environmental Protection Agency). As principais fontes de emissão analisadas foram transporte de carga da pedreira em vias não pavimentadas e pilhas de materiais expostas a céu aberto. Foram estimadas as emissões de material particulado para cada fonte com base nas fórmulas dos fatores de emissão especificados na AP-42 da USEPA. Em seguida, juntamente com as taxas de emissões calculadas foram inseridos no AERMOD dados meteorológicos convencionais da região, e dados de elevação da superfície da área em estudo. Foram levantados os dez maiores valores de concentração de MP2,5, MP10 e PTS no período de 24 horas para cada fonte individualmente e em conjunto. Os resultados mostraram que as concentrações de MP2,5 emitidas se mantiveram de acordo com a legislação CONAMA 491/2018 para ambas as fontes, inclusive na modelagem das dispersões totais. Em contrapartida, os resultados obtidos na modelagem de dispersão das vias não pavimentadas indicaram violações aos padrões de qualidade do ar para MP10 e PTS, onde as concentrações de chegaram a até 223,24 e 1729,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Já as dispersões de poluentes provenientes de depósitos de material a céu aberto não apresentaram nenhuma violação aos padrões de qualidade do ar. O resultado da modelagem das emissões totais mostrou que o poluente MP10 apresentou duas violações em relação ao padrão menos restritivo de qualidade do ar, já o poluente PTS obteve uma concentração máxima de 1245,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Desta forma, conclui-se que as vias não pavimentadas são a principal fonte de emissão analisada da pedreira.

Palavras-chave: Poluição atmosférica, material particulado, pedreiras, vias não pavimentadas, AERMOD.

ABSTRACT

Quarries are air pollution sources that occur through the production of pollutant emissions. The present research aims to evaluate the impact on air quality due to emissions from the industrial activity of a quarry, using the USEPA's (Environmental Protection Agency) AERMOD model. The main emission sources analyzed were unpaved roads and piles of materials exposed to an open pit. Each of the source's specific matter emissions were estimated based on the emission factor formula specified in USEPA AP-42. The calculated emission rates were also entered in the AERMOD region conventional weather data and surface elevation data from the specified area. The ten highest concentration values of MP2.5, MP10 and PTS over the 24-hour period were collected for each source individually and joined. The results showed that the emitted MP2.5 concentrations remained in accordance with CONAMA 491/2018 legislation for both sources, including the modeling of total dispersions. On the other hand, the unpaved road results dispersion modeling indicated violations of the air quality standards for MP10 and PTS with concentrations reaching up to 223.24 and 1729.15 $\mu\text{g m}^3$ respectively. Pollutant dispersions from open-air material deposits showed no violation of air quality standards. The results from the modeling of total emissions showed that the pollutant MP10 presented two violations in relation to the less restrictive air quality standard, whereas the pollutant PTS obtained a maximum concentration of 1245.53 $\mu\text{g/m}^3$. Therefore, the research findings revealed that unpaved roads are the main source of analyzed quarry emissions.

Keywords: Atmospheric pollution, particulate matter, quarries, unpaved roads, AERMOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estados extremos da pluma.....	25
Figura 2 - Área da pedreira, vias não pavimentadas e pilhas de materiais.....	32
Figura 3 - Fluxograma do cálculo da taxa de emissão para vias não pavimentadas. .	34
Figura 4 - Fluxograma do cálculo da taxa de emissão para os depósitos de material a céu aberto.	36
Figura 5 – Rosa dos ventos.....	38
Figura 6 – Uso do solo no entorno da pedreira.....	39
Figura 7 - Grade de Receptores.....	41
Figura 8 - Topografia da região da pedreira.	42
Figura 9 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por vias não pavimentadas	47
Figura 10 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.....	48
Figura 11 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por vias não pavimentadas, em um período de 24 horas.....	49
Figura 12 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.....	50
Figura 13 - Pluma de dispersão de PTS emitida por vias não pavimentadas, em um período de 24 horas.....	51
Figura 14 - Pluma de dispersão de PTS emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.....	52
Figura 15 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.....	55
Figura 16 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.....	56
Figura 17 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.....	57
Figura 18 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.....	58
Figura 19 - Pluma de dispersão de PTS emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.....	59
Figura 20 - Pluma de dispersão de PTS emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.....	60

Figura 21 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.....	64
Figura 22 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.....	65
Figura 23 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.....	66
Figura 24 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.....	67
Figura 25 - Pluma de dispersão de PTS emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.....	68
Figura 26 - Pluma de dispersão de PTS emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da taxa de emissão para as pilhas de material.	26
Tabela 2 - Estimativa de taxa de emissão para as vias não pavimentadas.	27
Tabela 3 - Resultado das taxas de emissão das vias não pavimentadas.	34
Tabela 4 - Resultados das taxas de emissão das pilhas de material.	36
Tabela 5 – Resultados dos parâmetros calculados.	39
Tabela 6 – Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o primeiro cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.	43
Tabela 7 - Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o segundo cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.	44
Tabela 8 - Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o terceiro cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.	45
Tabela 9 - Violações aos padrões de qualidade do ar do poluente MP10 para o segundo e terceiro cenário.	46
Tabela 10 - Maiores concentrações encontradas para cada poluente, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.	53
Tabela 11 - Maiores concentrações encontradas para cada poluente das fontes em conjunto, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.	61
Tabela 12 - Violações das concentrações de MP10 em relação aos parâmetros de qualidade ao ar.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USEPA United States Environmental Protection Agency

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

MP Material particulado

MP₁₀ Material particulado com diâmetro menos que 10 micrômetros

MP_{2,5} Material particulado com diâmetro menos que 2,5 micrômetros

PTS Partícula Total em Suspensão

CLP Camada Limite Planetária

PF Padrão Final

PI Padrão Intermediário

CPTEC Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

MDE Modelo Digital de Terreno

VTK Vehicle kilometers traveled

NOAA National Oceanic Atmospheric Administration

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MATERIAL PARTICULADO	17
2.2	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM PEDREIRAS	18
2.2.1	Vias não pavimentadas	19
2.2.2	Depósitos de material a céu aberto.....	19
2.3	MODELAGEM ATMOSFÉRICA	20
2.3.1	AERMOD.....	20
2.3.1.1	<i>Função Gaussiana</i>	21
2.3.1.2	<i>Camada Limite Planetária.....</i>	22
2.3.1.3	<i>Perfis Verticais</i>	23
2.3.1.4	<i>Influência da Topografia</i>	24
2.4	MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES EMITIDOS EM PEDREIRAS	25
2.5	LEGISLAÇÃO	27
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	31
3.2	ESTIMATIVA DE EMISSÕES	32
3.2.1	Vias não Pavimentadas.....	33
3.2.2	Depósitos de Material a Céu Aberto	35
3.3	MODELAGEM ATMOSFÉRICA COM O AERMOD.....	36
3.3.1	Dados Meteorológicos.....	37
3.3.2	Dados Topográficos	40

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	VIAS NÃO PAVIMENTADAS.....	43
4.2	DEPÓSITOS DE MATERIAL A CÉU ABERTO.....	53
4.3	DISPERSÃO TOTAL.....	61
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	70
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é considerada o maior risco ambiental para a saúde, principalmente quando estão presentes no ar altas concentrações de pequenas partículas (OPAS, 2016). Atualmente, as queimadas, o uso generalizado de automóveis e atividades industriais são as principais causas da poluição atmosférica (SILVA, 2000). Dentre as atividades industriais caracterizadas como poluidoras estão as mineradoras.

No Brasil, a indústria de mineração é uma peça fundamental para as estratégias econômicas e para o desenvolvimento do país. A produção e exportação de produtos minerais possibilitam fortemente a introdução do Brasil no cenário econômico internacional. Além disso, pelo Brasil apresentar grande dimensão territorial e diversidade de terrenos geológicos, este ostenta por possuir vastas áreas com potenciais de exploração mineral. Por outro lado, as atividades de mineração possuem um potencial impactante sobre o ambiente em que estão inseridas (CAMAREZ, 2004).

A atividade de mineração realizada a céu aberto, e também através do uso de explosivos constitui uma fonte de poluição atmosférica. Em pedreiras, ocorrem emissões atmosféricas durante suas principais atividades, as quais podem ser facilmente percebidas de forma visual através da poeira que a atividade emite (CAMAREZ, 2004). Tal poeira muitas vezes apresenta teores de sílica ou quartzo que são consideradas substâncias perigosas à saúde humana. (CAMAREZ, 2004). Para avaliar as emissões atmosféricas e investigar os reais impactos ambientais causados por tais fontes utiliza-se a modelagem atmosférica.

A modelagem atmosférica é de bastante utilidade tendo em vista que esta possibilita a realização de simulações e previsões das concentrações de poluentes na atmosfera (BARBON; GOMES, 2010). Também, para fins de licenciamento de empreendimentos potencialmente poluidores, a modelagem atmosférica se torna bastante importante na medida em que ela avalia o quanto a fonte em estudo contribui com a poluição do ar da região. Desta forma, torna-se possível definir se as concentrações de poluentes emitidos pela fonte emissora estão de acordo com o estabelecido pela legislação, a fim de não causarem danos à saúde da população exposta, além de prever soluções que permitam reduzir tais emissões.

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa aplicar o modelo AERMOD, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), para avaliar os impactos na qualidade do ar causados pelas atividades de uma pedreira. O modelo foi utilizado para simular concentrações de poluentes oriundas de pilhas de materiais expostas a

céu aberto, e tráfego de veículos pesados em vias não pavimentadas no interior do empreendimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto na qualidade do ar devido às emissões da atividade industrial de uma pedreira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o impacto na qualidade do ar causado pelo transporte de carga da pedreira em vias não pavimentadas;
- Avaliar o impacto na qualidade do ar causado pela ressuspensão de pilhas de materiais expostas à céu aberto;
- Comparar as simulações realizadas pelo AERMOD com as concentrações máximas permitidas com base na legislação CONAMA 491/2018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAL PARTICULADO

O material particulado (MP) é o termo utilizado para descrever uma complexa mistura de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes variam consideravelmente em tamanho, geometria, constituintes químicos e propriedades físicas (GODISH,1991). O MP é também conhecido como poeira ou fumaça, e quando presente na atmosfera como aerossol contribui com a redução de visibilidade, sendo este poluente o mais aparente na poluição do ar em centros urbanos.

O material particulado é classificado de acordo com o diâmetro de suas partículas. O tamanho das partículas varia entre $0,005\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$, onde as partículas menores são aglomerados moleculares e as maiores podem ser vistas a olho nu. As partículas com diâmetro inferior a $1\mu\text{m}$ comportam-se como gases, de modo que são capazes de contornar obstáculos, já as maiores são características de materiais sólidos, visto que são fortemente afetadas pela gravidade, e raramente se aglutinam (GODISH,1991).

Devido ao fato de existir uma relação entre o diâmetro das partículas e a capacidade de penetração no trato respiratório, as partículas são classificadas, de acordo com a CETESB (2008), em Partículas Totais em Suspensão, inaláveis, inaláveis finas e fumaça.

As Partículas Totais em Suspensão (PTS) são aquelas que possuem diâmetro aerodinâmico menor que $50\mu\text{m}$. Parte destas partículas são inaláveis, podendo causar danos à saúde humana, outra parte afeta negativamente o cotidiano da população, visto que interfere na visibilidade do ambiente, prejudicando as atividades rotineiras da comunidade (CETESB, 2019).

As Partículas Inaláveis (MP10) são aquelas que possuem diâmetro menor que $10\mu\text{m}$. Dependendo do tamanho da partícula, esta pode ficar retida na parte superior das vias respiratórias ou penetrar até atingir os alvéolos pulmonares (CETESB, 2008).

As Partículas Finas (MP2,5) são aquelas que possuem diâmetro inferior ou igual a $2,5\mu\text{m}$. Devido ao seu tamanho reduzido, estas penetram profundamente no sistema respiratório, podendo atingir a região dos alvéolos pulmonares (CETESB, 2008).

A Fumaça (FMC) está associada ao material particulado suspenso no ar atmosférico proveniente de processos de combustão, e está diretamente relacionada ao teor de fuligem presente na atmosfera (CETESB, 2008).

O material particulado é constituído principalmente por sulfato, nitrato, íons de hidrogênio e amônia, gotículas de água, carbono elementar, compostos orgânicos, sal marinho, metais, entre outros, onde suas concentrações dependem do local em que o MP foi originado (EPA, 2010). Segundo a CETESB (2017), as principais fontes de material particulado de 2,5 μ m a 10 μ m de diâmetro são a queima de combustíveis fósseis, queima de biomassa vegetal, emissões de amônia na agricultura, emissões provenientes de vias não pavimentadas, e atividades de mineração. Ademais, o poluente pode ser classificado em primário ou secundário conforme é encontrado na atmosfera (EPA, 2010).

O MP primário é aquele que se apresenta na mesma forma química em que foi emitido na atmosfera, o qual inclui elementos como a poeira, maresia, partículas de vias, e fuligem, além de compostos metálicos como Arsênio, Selênio e Zinco. A concentração das partículas primárias depende de sua taxa de emissão, transporte, dispersão e taxa de remoção da atmosfera (EPA, 2010).

Em contrapartida, o MP secundário é aquele originado por reações químicas de gases na atmosfera, este possui processos que podem resultar na formação de novas partículas em junção com o MP já existente. A maior parte do nitrito, sulfato e compostos orgânicos é formada por reações químicas que ocorrem na atmosfera. Ademais, a formação secundária de partículas depende das condições atmosféricas, das concentrações de seus precursores e de outras substâncias reativas gasosas como ozônio, radical hidroxil, radicais peroxi e peróxido de hidrogênio (EPA, 2010).

Os principais fatores que influenciam a dispersão do material particulado na atmosfera são o vento, a turbulência, a estabilidade da atmosfera, topografia, uso do solo e processos de remoção (HOINASKI, 2010).

2.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM PEDREIRAS

As atividades de mineração desempenham um papel positivo no desenvolvimento econômico de um país. A exploração mineral próxima a áreas urbanas é uma importante atividade para o crescimento das cidades, visto que tal atividade trata da oferta de matérias-primas para a construção civil, havendo uma grande tendência de aproximação entre os locais de produção e de consumo (RUIZ, 1989). Em contrapartida, as pedreiras causam impacto ao meio ambiente, o qual não deve ser ignorado e, a certo modo, é inevitável, como também ocorre em outros setores industriais (CHAULYA; CHAKRABORTY; SINGH, 2001).

A exploração de pedreiras realizada a céu aberto é uma fonte potencial de poluição do ar. Além do próprio ato de extração de material, as atividades de transporte do minério, carga, descarga, britagem, processamento e estocagem emitem partículas de poeira para a atmosfera. Existem diversas fontes de emissões de particulados em pedreiras, no entanto, destas as principais são: tráfego de veículos pesados em vias de serviços não pavimentadas e a dispersão do material processado e armazenado nos depósitos a céu aberto (CAMAREZ, 2004).

2.2.1 Vias não pavimentadas

As fontes mais frequentes de emissões de particulados nas pedreiras são as vias de serviço não pavimentadas (CAMAREZ, 2004). Nestes acessos, os veículos exercem uma força na superfície através de suas rodas, o que ocasiona a suspensão de partículas de materiais à atmosfera. As partículas são facilmente suspensas quando a superfície das vias é exposta a fortes correntes de ar em movimento turbulento, e após a passagem dos veículos, a corrente de ar permanece, continuando o processo de suspensão das partículas da via ao ar atmosférico (USEPA, 1995).

A quantidade de emissões de poeira de um trecho da via não pavimentada varia proporcionalmente com o volume de tráfego, além do peso médio dos veículos, e características do material que compõem a via.

2.2.2 Depósitos de material a céu aberto

As pilhas de armazenamento advindas das operações realizadas em pedreiras são, de maneira geral, minerais na forma de agregados que são mantidas descobertas e expostas a céu aberto, devido à necessidade de frequentes transferências do material. As emissões de poeira ocorrem em vários momentos do ciclo do armazenamento, desde o carregamento do material até a erosão causada por fortes correntes de vento. Além do mais, movimento de veículos pesados e o carregamento de equipamentos próximos às pilhas de armazenamento também emitem poeira à atmosfera (USEPA, 1995).

As emissões de partículas durante a operação de armazenamento dos agregados variam conforme o volume de material que passa pelo ciclo do armazenamento. Além disso, as emissões nas pilhas dependem de três outros parâmetros: idade da pilha, teor de umidade e

proporção de finos agregados. Quando o material é recém - processado considera-se que o potencial de emissão da pilha se encontra no máximo, de modo que com a presença de correntes de ar, as partículas do material são facilmente desagregadas e liberadas para a atmosfera. No entanto, à medida que o tempo passa e a pilha reduz seu volume o potencial de emissão diminui consideravelmente (USEPA, 1995).

Ademais, as emissões de poeira através das pilhas de armazenamento de agregados também ocorrem no processo de adicionar um volume de material na superfície receptora, ou seja, na pilha já existente, ocasionando uma suspensão tanto do novo material quanto do já presente na pilha (USEPA, 1995).

2.3 MODELAGEM ATMOSFÉRICA

A modelagem atmosférica possui grande importância nos estudos de qualidade do ar, visto que ela torna possível a representação do comportamento de poluentes quando emitidos à atmosfera através de dados que caracterizam a região de estudo, além de prever as características da qualidade do ar próxima ao empreendimento potencialmente poluidor. O modelo utilizado neste trabalho é o AERMOD, e a estrutura dos cálculos usados nesta modelagem é baseada em seu próprio manual, disponibilizado pela US-EPA (1995).

2.3.1 AERMOD

O AERMOD é um sistema de modelagem que incorpora em seus cálculos de dispersão do ar conceitos de turbulência e escala, além de incluir diferentes tipos de fontes, sejam elas elevadas ou superficiais, e, também, considera as influências da topografia. O modelo analisa de maneira distinta a dispersão de poluentes em condições atmosféricas estáveis e instáveis, sendo que em condições instáveis há mais turbulência e a dispersão ocorre de maneira mais significativa. Em condições estáveis de dispersão a pluma é representada por uma função gaussiana, tanto para a dispersão horizontal quanto vertical dos poluentes (USEPA, 2019).

O modelo AERMOD utiliza de dois pré-processadores que se aplicam como componentes reguladores do software, servindo como dados de entrada do sistema. O primeiro processador é o AERMET que conta com informações sobre parâmetros meteorológicos, como a turbulência da camada limite planetária e conceitos de escala. O

segundo processador é o AERMAP, este incorpora as informações de terreno ao modelo através de dados de elevação digital (USEPA, 2019).

2.3.1.1 Função Gaussiana

O AERMOD é um modelo gaussiano, e para melhor entendê-lo é necessária a compreensão de sua formulação, mais precisamente relacionada à equação de dispersão. Os conceitos da função gaussiana formulam os cálculos de dispersão realizados pelo modelo computacional AERMOD.

Os modelos gaussianos assumem que os poluentes são dispersos ao redor do eixo da pluma de acordo com a distribuição normal Gaussiana, que se assemelha a um sino e é conhecida como “Curva de Gauss”.

Assume-se que em modelos gaussianos a diluição da pluma de poluentes ocorre da seguinte forma: na direção x, a favor do vento, onde a pluma é diluída pelo vento; na direção y, perpendicular ao vento, onde a pluma é diluída por movimentos convectivos de ar; e, na direção z, vertical, em que a pluma dilui-se por movimentos aleatórios de massas de ar. Na direção z a pluma se propaga em função da delimitação do solo e por inversões de temperatura, o que impede a elevação da pluma até altitudes elevadas (MARQUES, 2017).

Desta forma, divide-se a equação da pluma gaussiana em três partes, cada parte representa a diluição da pluma nos eixos supracitados (x, y, z) conforme a equação abaixo:

$$\bar{c} = C_x \varphi_y \varphi_z \quad (1)$$

Onde C_x , φ_y e φ_z são os parâmetros de diluição em cada um dos eixos, conforme apresentado nas fórmulas a seguir.

$$C_x = \frac{Q}{\bar{u}} \quad (2)$$

Onde:

Q é a taxa de emissão (mg/s);

\bar{u} é a velocidade média do vento (m/s).

$$\varphi_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{1y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

Onde:

y é a distância lateral do eixo da pluma (m);

σ_y é um parâmetro de propagação na direção horizontal (m).

$$\varphi_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \left\{ \exp \left[-\frac{1(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{1(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (4)$$

Onde:

z é a altura acima da superfície (m);

σ_z é um parâmetro de propagação na direção vertical (m);

h é a altura efetiva da fonte (m) e é a soma da altura da chaminé com a elevação da pluma.

Por fim, combinando as equações acima obtém-se a equação gaussiana da pluma.

$$C_{(x,y,z,H)} = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{1(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (5)$$

Vale salientar que em condições atmosféricas estáveis (Stable Boundary Layer – SBL) e instáveis o modelo analisa e avalia a dispersão dos poluentes. Nas condições instáveis ocorre maior turbulência e a dispersão ocorre de forma mais intensa, fenômeno chamado de Convective Boundary Layer (CBL). Desta forma, assume-se que em condições atmosféricas estáveis (SBL) a distribuição das concentrações é gaussiana tanto na vertical quanto na horizontal, já, na camada limite convectiva (CBL) a distribuição horizontal também é gaussiana, no entanto, a distribuição vertical é descrita em função da densidade de probabilidade bi-gaussiana.

2.3.1.2 Camada Limite Planetária

A camada limite planetária (CLP) é a região situada na baixa troposfera, próxima a superfície terrestre, onde o movimento dos ventos na atmosfera sofre grande interferência da superfície. Quanto maior a proximidade dos ventos com a superfície maior é a influência, de modo que em maiores altitudes a velocidade do vento é mais intensa, resultando em uma curva onde a velocidade do vento tende a zero em $z = 0$, e máxima em $z = z_1$, onde z_1 é a altura da camada limite.

A altura da camada limite é influenciada, principalmente, pela atividade convectiva, distribuição de aerossóis e formação de nuvens, as quais ocorrem através de mecanismos de transferência turbulenta. A camada limite tende a ser mais fina em regiões de alta pressão,

onde a dissipação do ar e o movimento divergente a movem dos níveis mais altos para altitudes menores. Em regiões de baixa pressão, movimentos ascendentes transportam o ar para altitudes altas, distante do solo (MOREIRA, 2013).

O modelo AERMOD estima os parâmetros de perfil vertical e as forças atuantes que são responsáveis pela altura da camada limite, através de seu pré-processador AERMET. Esta interface meteorológica utiliza de dados meteorológicos para calcular e determinar parâmetros importantes para a dispersão de poluentes, como fluxo de calor sensível, velocidade de fricção, Monin-Obukov, velocidade convectiva, dentre outros (CIMORELLI et al., 2004).

2.3.1.3 Perfis Verticais

O modelo AERMOD, dentro de sua interface meteorológica, calcula perfis verticais sendo eles: direção do vento, velocidade do vento, temperatura, gradiente vertical de temperatura potencial, turbulência vertical e turbulência horizontal.

O modelo necessita de dados de temperatura, direção e velocidade do vento da região em estudo para realizar os cálculos. O perfil de direção do vento é considerado constante em qualquer altitude, tanto para condições estáveis quanto instáveis. Já, o perfil de velocidade do vento possui formato logaritmo quando calculado pelo AERMOD, o qual utiliza de equações que permitem um decaimento linear deste parâmetro, permitindo considerar a interação do vento com os obstáculos presentes em altitudes baixas.

Para o cálculo de perfil de temperatura, o modelo faz uma soma do gradiente de temperatura referente à camada Δz com a temperatura potencial na altura z . A interface meteorológica do AERMOD calcula também, através de equações, o perfil de gradiente vertical de temperatura potencial para condições estáveis, resultando em uma relação inversa do gradiente com a atitude. Já, para condições instáveis, o valor deste perfil é tido como zero.

A interface meteorológica calcula o perfil de turbulência vertical através da soma da turbulência horizontal convectiva com a turbulência horizontal mecânica. Quando a turbulência convectiva é influenciada pela escala de velocidade convectiva, a turbulência mecânica é função da velocidade de fricção. Em condições estáveis a variável convectiva é desprezada.

Por fim, seguindo a mesma lógica do cálculo do perfil de turbulência vertical, o horizontal utiliza das grandezas mecânica e convectiva, onde em condições estáveis considera apenas a porção mecânica.

2.3.1.4 Influência da Topografia

O modelo AERMOD representa interação entre a pluma e o relevo de diferentes formas, a primeira considera que a pluma percorre uma trajetória horizontal, seguindo a direção média do vento, até atingir relevos elevados. A outra forma considera que a pluma acompanha as variações do relevo. A concentração final é a soma das duas formas de plumas, onde cada uma é multiplicada por um coeficiente para melhor representação da realidade, conforme apresentado na equação a seguir.

$$C_T\{X_r, y_r, Z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{X_r, y_r, Z_r\} + (1 - f)C_{c,s}\{X_r, y_r, Z_p\} \quad (6)$$

Onde:

$C_T\{X_r, y_r, Z_r\}$ é a concentração total;

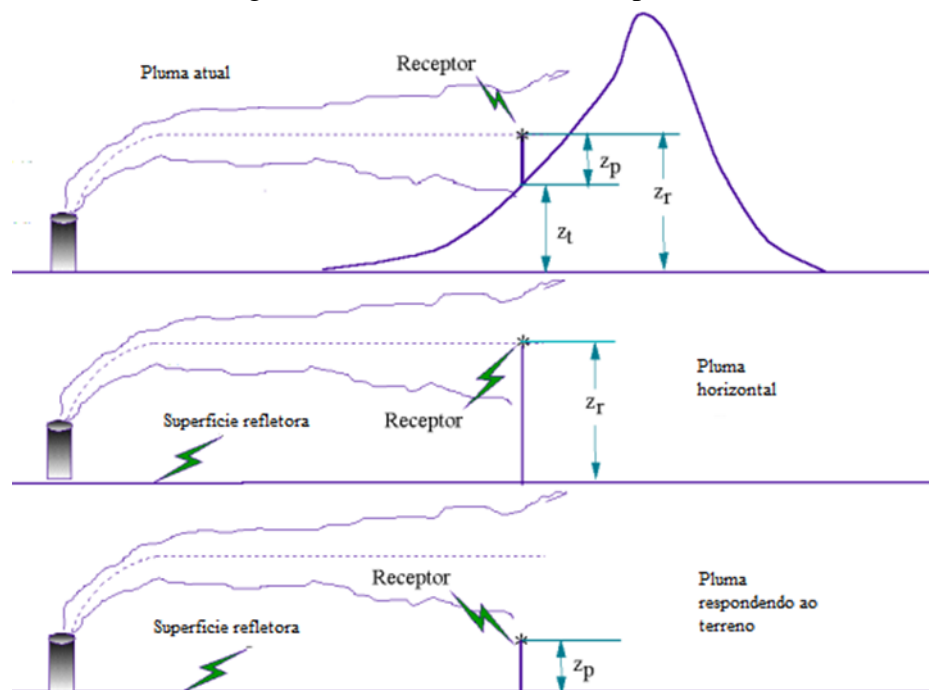
$C_{c,s}\{X_r, y_r, Z_r\}$ é a pluma horizontal;

$C_{c,s}\{X_r, y_r, Z_p\}$ é a pluma que acompanha o terreno;

f é a função de ponderação entre os dois tipos de plumas.

Usa-se a mesma equação para ambas as plumas, no entanto, a coordenada z varia. Na pluma horizontal a coordenada z_r é a altura do receptor, e no caso em que a pluma acompanha o terreno, a coordenada z_p é a altura do ponto em estudo diminuída da altura do terreno (Figura 1). Já, o coeficiente f depende principalmente da velocidade do vento, visto que quanto maior a velocidade do vento, maior é a instabilidade da atmosfera permitindo que a pluma se eleve de forma a acompanhar o relevo, e, conseqüentemente, maior será f .

Figura 1 – Estados extremos da pluma.



Fonte: EPA, 2004.

2.4 MODELAGEM DE DISPERSÃO DE POLUENTES EMITIDOS EM PEDREIRAS

Estudos da mesma natureza deste trabalho podem ser encontrados na literatura. Abril et al. (2015) desenvolveu um estudo de modelagem de dispersão atmosférica na cidade de Malagueno, província de Córdoba na Argentina. Neste estudo análises foram realizadas, com o auxílio do AERMOD, da emissão, transporte, dispersão e concentração de material particulado emitido em um grande complexo industrial dedicado à fabricação de cimento. O período de análise foi realizado durante o inverno.

Segundo Abril et al. (2015), O modelo foi aplicado em 224 fontes de emissão industrial, sendo o principal poluente avaliado o material particulado em suspensão (PTS). As fontes analisadas foram: pilhas de materiais, pedreiras de calcário, locais de armazenamento de calcário, campos agrícolas, vias pavimentadas e não pavimentadas. Nas pedreiras foram consideradas as atividades como britagem primária, secundária e terciária, além do carregamento e descarregamento de caminhões.

No estudo, os fatores de emissão de cada fonte foram estimados utilizando a Compilação de Fatores de Emissão de Poluentes do Ar (AP-42) desenvolvido pela USEPA. As informações meteorológicas usadas como dados de entrada para o modelo foram retirados

da estação mais próxima, situada a 15 km da área de estudo, e os dados de terreno foram fornecidos por uma agência consultora de qualidade ambiental da região, onde foi definida uma grade de 27 km com 1600 receptores.

Para o cálculo das taxas de emissão das pilhas de material, Abril et al (2015) utilizou da seguinte formulação:

$$E = k * (0,0016) * \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \quad (7)$$

Sendo: velocidade do vento (U) igual a 4m/s, e teor de umidade do material (M) igual a 0,25%. O valor da constante k foi de 0,74.

A taxa de produção utilizada foi de 1.900.800 t/ano para a primeira usina de cimento, e 3.168.000 t/ano para a segunda usina de cimento pertencente ao complexo. Desta forma, levando em conta as dimensões das pilhas, as taxas de emissão calculadas para as pilhas de material podem ser visualizadas na Tabela 1

Tabela 1 - Estimativa da taxa de emissão para as pilhas de material.

Fontes	Taxa de Emissão (g/s.m²)
Pilha 1	0,000463
Pilha 2	0,000405
Pilha 3	0,000358
Pilha 4	0,0000571
Pilha 5	0,000437

Fonte: Abril et al (2015).

Já para o cálculo das taxas de emissão das vias não pavimentadas pertencentes ao complexo industrial, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$E = 281,9 \left[\frac{k \left(\frac{s}{12}\right) \left(\frac{s}{30}\right)^{0,3}}{\left(\frac{M}{0,5}\right)^{0,3}} - 0,00047 \right] * \left(\frac{365-p}{365}\right) \quad (8)$$

Sendo: percentual de silte (s) igual 16,6%, velocidade média do veículo (S) igual a 15,5 mph, teor de umidade (M) igual a 6,5%, e número de dias chuvosos (P) igual a 160.

O fator de emissão considerado para as vias não pavimentadas foi de 498,9 g/VKT, onde VKT representa a distância trafegada pelos veículos. Já a taxa de atividade que envolve contagem de veículos e comprimento do trecho da via, assim como as taxas de emissões encontradas podem ser visualizadas a Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa de taxa de emissão para as vias não pavimentadas.

Vias	Comprimento do trecho (km)	Contagem de veículos (veíc/h)	Taxa de emissão (g/s.m²)
1	0,32	26	0,000018
2	0,23	22	0,000016
3	0,74	32	0,00000005
4	0,75	46	0,000000071

Como resultado, Abril et al. (2015) concluiu que maiores valores de concentração de PTS foram centralizados nas proximidades das fontes de emissão, no entanto a cerca de 1km de distância as concentrações já diminuíram em até 800 e 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

As atividades de britagem e carregamento de caminhões nas pedreiras tiveram resultados de concentração de PTS de até 1000mg/m³. Em relação às pilhas de armazenamento de material, os resultados atingiram elevados valores de até 2.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo a principal fonte emissora de PTS na área em estudo. A respeito das estradas industriais, a maior concentração de PTS foi de 2.100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, encontrada nas vias não pavimentadas que levam até as pedreiras. No caso das fontes pontuais (locais de estocagem de calcário) os valores das concentrações de PTS não foram significativos, o qual o valor máximo encontrado foi de 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Desta forma, os resultados obtidos neste estudo mostraram que as estradas não pavimentadas e as pilhas de materiais foram as principais fontes de emissão de material particulado a atmosfera.

2.5 LEGISLAÇÃO

Os padrões de qualidade do ar determinam legalmente os limites máximos permitidos de concentrações de determinados poluentes atmosféricos, com a finalidade de

preservar a qualidade do ar, de forma que as emissões se mantenham dentro dos níveis que não causem danos ao meio ambiente e à saúde humana (SILVA, 1997).

A regulamentação dos padrões de qualidade do ar no Brasil deu início no ano de 1981, quando foi instituída a Lei nº 6.938. Esta lei criou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), e lhe conferiu competências para estabelecer padrões ambientais, incluindo os padrões de qualidade do ar.

Em 1989 foi criado o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR), através da Resolução CONAMA nº 5 de 15/06/1989. Representando um grande avanço na preservação ambiental, este programa tinha como objetivo limitar os níveis de emissão de poluentes, adotar padrões nacionais de qualidade do ar, gerenciar o licenciamento de fontes de poluição, criar um inventário nacional, gerir políticas, desenvolver a área de poluição atmosférica no país, monitorar a qualidade do ar e, por fim, promover ações de curto, médio e longo prazo (NORONHA, 2010).

O PRONAR também estabeleceu diferentes classes de enquadramento para todas as áreas do território nacional: a) classe I, áreas em que a qualidade do ar deve ser mantida mais próxima do natural sem a intervenção humana, b) classe II, áreas em que a qualidade do ar possua nível de deterioração limitado pelo padrão secundário de qualidade, c) classe III, destinadas a áreas de desenvolvimento, onde o nível de qualidade do ar seja limitado pelo padrão primário de qualidade.

No ano de 1990, foi instituída a Resolução CONAMA nº 3, que em conjunto com o PRONAR, estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar para os seguintes poluentes: Partículas Totais em Suspensão, fumaça, partículas inaláveis, Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono, Ozônio e Dióxido de Nitrogênio. Ademais, esta resolução atribuiu a todos os Estados o monitoramento da qualidade do ar, e preconizou níveis para elaboração do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, plano definido para ocasiões em que haja altas concentrações de poluentes na atmosfera em um curto período de tempo, devido a condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes (SILVA, 1997).

Em 2018, a Resolução CONAMA nº 3 supracitada foi revogada e substituída pela Resolução CONAMA nº 491/2018. Segundo esta Resolução, o padrão de qualidade do ar é um dos instrumentos de gestão de qualidade atmosférica, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição para que o meio ambiente e a saúde humana sejam preservados.

Esta Resolução dividiu os padrões de qualidade do ar em duas categorias sendo elas: padrões intermediários (PI), aqueles estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas, e padrões final (PF), valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

A Resolução CONAMA 491/2018 traz ainda a aplicação dos padrões de qualidade do ar estabelecidos, onde os divide em quatro etapas. A primeira etapa compreende aos Padrões Intermediários (PI-1), os quais entraram em vigor com a publicação da resolução. As etapas seguintes dizem respeito aos Padrões de Qualidade do Ar Intermediários e Final (PI-2, PI-3 e PF) que serão adotados em forma sequencial, levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar elaborados pelos órgãos estaduais do meio ambiente. Em contrapartida, segundo a resolução, para alguns poluentes como Monóxido de Carbono, Partículas Totais em Suspensão e Chumbo será adotado o Padrão Final, não havendo as etapas de aplicação dos padrões de qualidade.

O Quadro 1 mostra os atuais padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018.

Quadro 1 - Concentrações máximas permitidas pela resolução CONAMA 491/2018.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado – MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material Particulado – MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre – SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio – NO ₂	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
Ozônio – O ₃	8 horas	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão	24 horas	-	-	-	240	-

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm
- PTS	Anual	-	-	-	80	-
Chumbo – Pb	Anual	-	-	-	0,5	-

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em realizar o estudo de dispersão dos poluentes gerados pelas atividades da pedreira. Para tanto, esta etapa é dividida em seis fases, sendo estas:

- Caracterização das fontes;
- Estimativa de emissões;
- Modelagem com o AERMOD;
- Dados meteorológicos;
- Dados de topografia e definição de receptores;
- Análise de resultados.

Na primeira fase, a pedreira em estudo é caracterizada juntamente com as principais fontes emissoras situadas em seu interior. Em seguida, é realizada a estimativa de emissões, onde são calculadas as taxas de emissões para cada fonte poluidora em estudo, sendo elas as vias não pavimentadas e as pilhas armazenadas a céu aberto. As taxas de emissões calculadas são valores fundamentais para a execução do modelo.

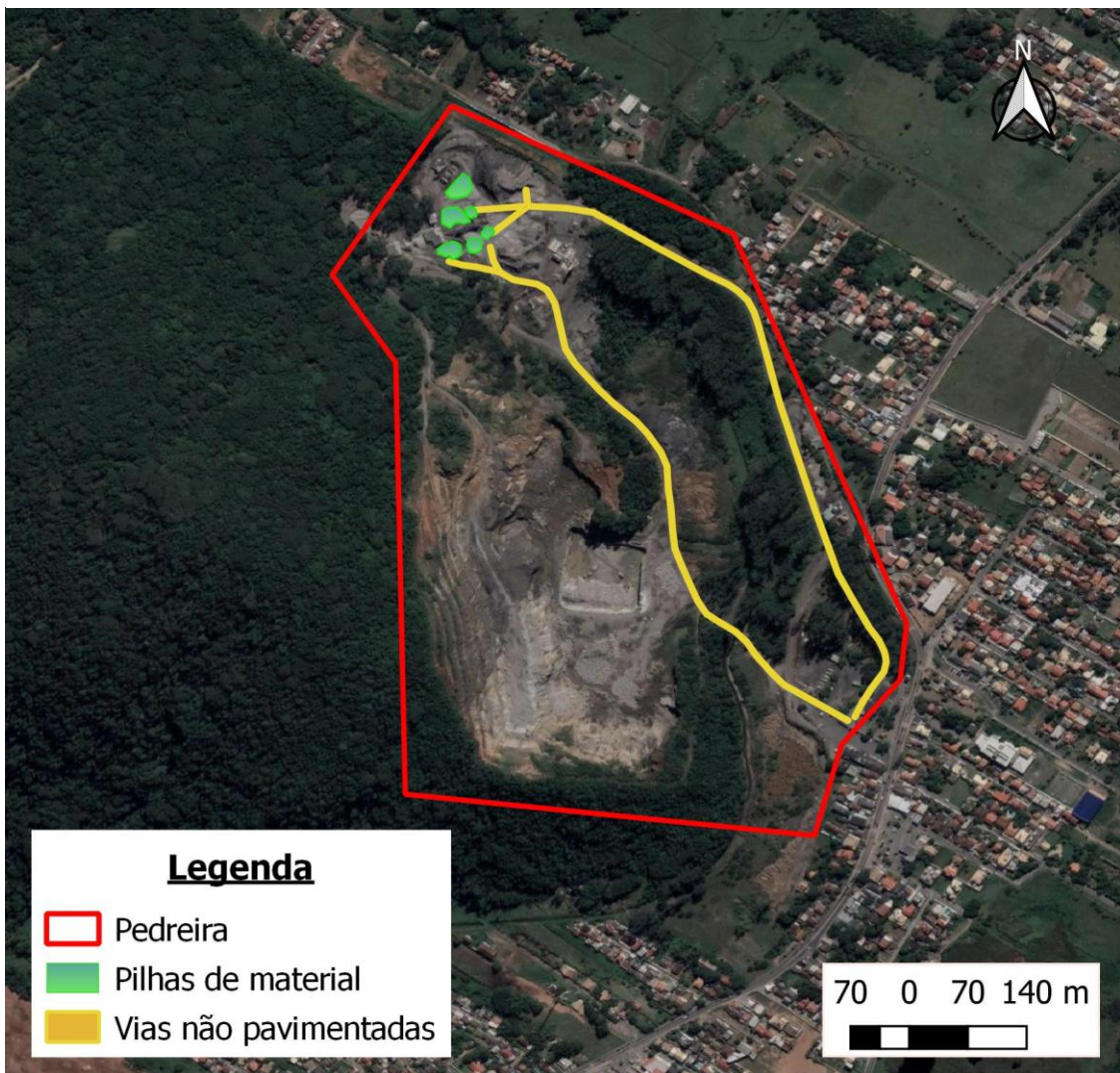
Na sequência, são levantados dados meteorológicos e de terreno da região em que a pedreira está situada, estes dados são manipulados e introduzidos diretamente à fase de preparação do modelo, onde todas as informações levantadas até então são introduzidas ao modelo.

Por fim, é realizada a modelagem através de esforços computacionais, onde são gerados os resultados procurados para cada fonte de emissão analisada.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A pedreira em estudo possui área de aproximadamente 10 hectares, está em fase de operação, e encontra-se introduzida em uma área urbana. A pedreira conta com cerca de 3 km de vias não pavimentadas, as quais dão acesso às áreas de desmonte de rocha, unidades de britagem e locais de depósitos de materiais. Além disso, há seis pilhas de depósitos de material britado armazenadas a céu aberto no interior da pedreira, inerentes à atividade de mineração.

Figura 2 - Área da pedreira, vias não pavimentadas e pilhas de materiais.



3.2 ESTIMATIVA DE EMISSÕES

A estimativa de emissões foi determinada com base nos fatores de emissão especificados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (US-EPA / AP-42). Foi estimada a geração de MP para as duas principais fontes de poluição do local: tráfego de veículos pesados nas vias não pavimentadas da pedreira e a dispersão pela ação do vento nos depósitos de material a céu aberto.

3.2.1 Vias não Pavimentadas

A emissão de poluentes advinda do tráfego de veículos pesados nas vias não pavimentadas no interior da pedreira ocorre devido à força exercida pelas rodas dos veículos nas vias, a qual suspende as partículas superficiais, e com a ajuda das rajadas de vento os poluentes se dispersam pelo ar local.

Para o cálculo do fator de emissão de material particulado em vias não pavimentadas são necessários dados referentes ao teor de silte presente na superfície da via (percentual de partículas com diâmetro inferior a 75 micrômetros), e peso médio dos veículos que trafegam pelas vias. Além do mais, a quantidade de MP emitido pelas vias é diretamente proporcional ao número de veículos que percorrem a via.

A equação utilizada para cálculo de material particulado em vias não pavimentadas foi retirada do capítulo 13.2.2 da AP-42, e pode ser vista a seguir:

$$E = k * \left(\frac{s}{12}\right)^a * \left(\frac{W}{3}\right)^b \quad (9)$$

Onde:

E = Fator de emissão (lb/milhas percorridas);

s = Teor de silte na superfície (%);

W = Peso médio de veículos (toneladas);

k, a, b = Constantes empíricas baseadas no tamanho das partículas.

O teor de silte na superfície foi definido como 10%, valor médio sugerido pela AP-42 em atividades de pedreiras, também foram calculados cenários com um valor de silte mínimo de 2,4%, e máximo de 16%.

Já o peso médio dos veículos que trafegam nas vias locais é de 30 toneladas, considerando caminhões modelo Cargo 2629 e 3133.

As constantes empíricas foram retiradas da tabela 13.2.2-2 da AP-42.

Também, foi utilizado um fator de conversão para converter o fator de emissão calculado para gramas/quilômetros percorridos, o fator usado foi:

$$1 \frac{lb}{mi} = 281,9 \frac{g}{km} \quad (10)$$

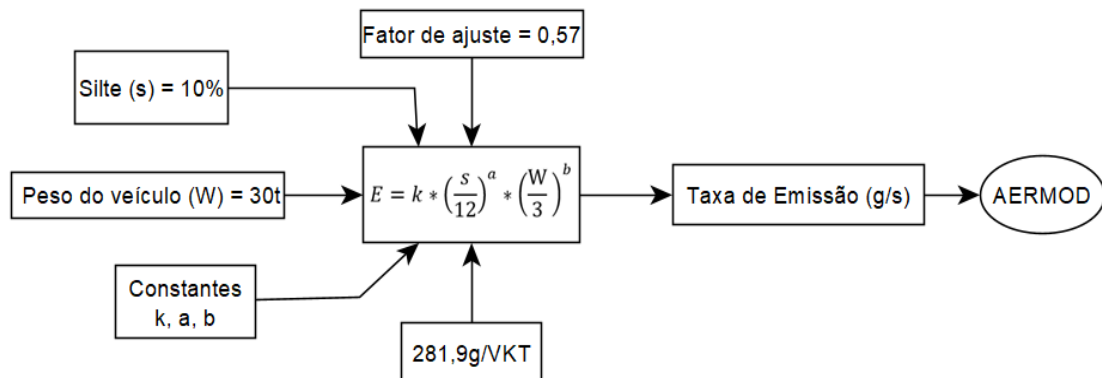
Ademais é considerado que a umidade tende a reduzir a emissão de MP nas vias, desta forma as emissões médias anuais são inversamente proporcionais ao número de dias chuvosos, ou seja, aqueles cuja precipitação ultrapassa 0,254 mm. Assim, através da equação a seguir foi calculado um fator de ajuste de 0,57, que foi introduzido ao cálculo do fator de emissão. O parâmetro P representa o numero de dias chuvosos do ano.

$$\text{Fator de ajuste} = [(365 - P)/365]$$

Por fim, calculou-se o quanto foi trafegado nas vias no período de uma hora, para isto foi considerado um tráfego de veículos de 4 caminhões por hora, chegando a uma distância total percorrida de 32,8km/h.

A figura a seguir exemplifica em forma de fluxograma o cálculo realizado neste trabalho da estimativa de emissão para as vias não pavimentadas.

Figura 3 - Fluxograma do cálculo da taxa de emissão para vias não pavimentadas.



A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos da estimativa de emissões nas vias não pavimentadas da pedra para diferentes teores de silte, resultando assim em taxas mínimas, médias e máximas.

Tabela 3 - Resultado das taxas de emissão das vias não pavimentadas.

Fonte	Teor de silte (%)	Área (m ²)	Taxa de emissão de MP2,5 (g/s.m ²)	Taxa de emissão de MP10 (g/s.m ²)	Taxa de emissão de PTS (g/s.m ²)
VIA1	2,4		0,0000003	0,00000251	0,00002839
VIA1	10	9230	0,0000009	0,00000906	0,00007710
VIA1	16		0,0000014	0,00001383	0,00010714
VIA2	2,4	9423	0,0000002	0,00000246	0,00002781

VIA2	10	0,0000009	0,00000887	0,00007553
VIA2	16	0,0000014	0,00001355	0,00010495

3.2.2 Depósitos de Material a Céu Aberto

Os depósitos de material a céu aberto são referentes às atividades de mineração, devido à necessidade de armazenar o material britado em um local até o momento de sua coleta. As emissões de MP nos depósitos de materiais se dão principalmente devido a ação do vento que ao entrar em contato com as pilhas causa a suspensão de materiais para a atmosfera.

Para o cálculo da emissão de MP por depósitos de material a céu aberto utilizou-se da equação presente no capítulo 13.2.4 da AP-42, e esta pode ser vista a seguir:

$$E = k * (0,0016) * \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} \quad (11)$$

Onde:

E = Fator de emissão (kg/mg);

k = Multiplicador do tamanho da partícula (adimensional);

U = Velocidade média do vento (m/s);

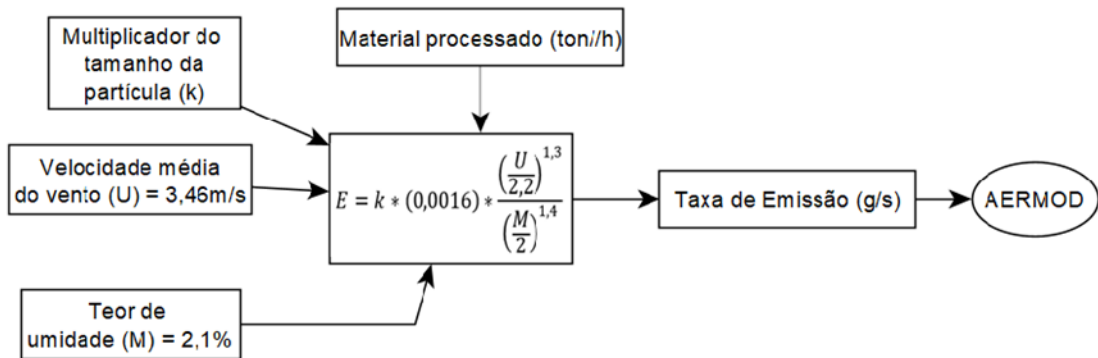
M = Teor de umidade do material (%).

Os fatores que possuem maior influência sobre a emissão de MP em depósitos de materiais são a velocidade média do vento e o teor de umidade do material. Para o cálculo do fator de emissão foi definida uma velocidade média do vento através de dados históricos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), calculou-se a velocidade média do vento em um período de cinco anos, a qual resultou em um valor de 3,46 m/s. Já, o teor de umidade do material foi definido como sendo de 2,1%.

O valor do multiplicador para cada tamanho da partícula (k) foi retirado na tabela presente na AP-42 no capítulo 13.2.4. Também, foi calculado um valor de material processado para cada depósito, através de parâmetros como produção mensal e áreas das pilhas, os resultados estão apresentados na Tabela 4.

A Figura 4 apresenta em forma de fluxograma os cálculos da taxa de emissão realizados para as pilhas de material.

Figura 4 - Fluxograma do cálculo da taxa de emissão para os depósitos de material a céu aberto.



A Tabela 4 apresenta os resultados das taxas de emissões calculadas para cada pilha de material exposta a céu aberto.

Tabela 4 - Resultados das taxas de emissão das pilhas de material.

Pilha	Material	Taxa de emissão	Taxa de emissão	Taxa de emissão
	Processado(ton/mês)	de MP2,5 (g/s.m ²)	de MP10 (g/s.m ²)	de PTS (g/s.m ²)
1	10620,7	0,029	0,014	0,002
2	14289,7	0,039	0,019	0,003
3	8174,71	0,023	0,011	0,002
4	4055,2	0,011	0,005	0,001
5	10620,7	0,029	0,014	0,002
6	22239,08	0,062	0,029	0,004

3.3 MODELAGEM ATMOSFÉRICA COM O AERMOD

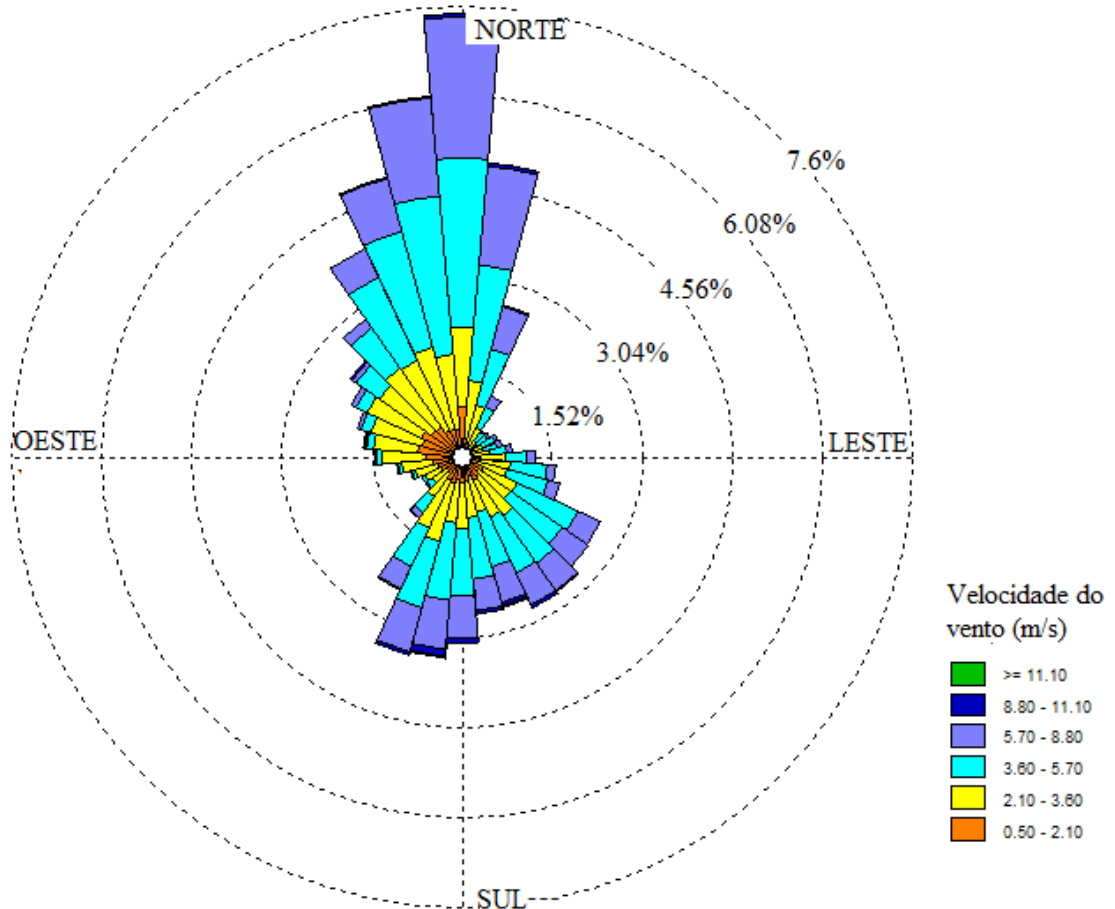
O software AERMOD trata a dispersão de poluentes atmosféricos com o auxílio de dois processadores. O processador meteorológico (AERMET) necessita de dados meteorológicos convencionais da região em que se encontra a pedreira, a fim de realizar a estimativa de turbulência e altura da camada limite. Já, o processador de terreno (AERMAP) requer dados de elevação da superfície da área em estudo. Desta forma, o AERMOD recebe dados de ambos os processadores e através de esforços computacionais realiza a modelagem de dispersão dos poluentes.

3.3.1 Dados Meteorológicos

Para o desenvolvimento do estudo foram usados dados meteorológicos fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Utilizou-se uma amostra de dados referente a cinco anos consecutivos (2013 a 2017), sendo estes dados em formato METAR da estação meteorológica de superfície, situada no aeroporto de Florianópolis, código SBFL. Já, os dados de sondagem (*upper air data*) foram fornecidos pelo Banco de Dados de Radio Sondagem da National Oceanic and Atmospheric Administration - Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), através da estação localizada no aeroporto de Florianópolis, código 83899.

Os dados fornecidos pelo CPTEC contêm informações de direção do vento (graus), velocidade do vento (m/s), altura da base das nuvens (m), cobertura de nuvens (%), pressão (hPa), temperatura do ar (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C) e visibilidade horizontal (m). Além de que, com os dados meteorológicos consolidados de 2013 a 2017 é possível obter a rosa dos ventos (Figura 5). A partir dela pode-se afirmar que, no local, os ventos sopram sentido norte, noroeste e também sul, com rajadas predominantemente entre 3,6 e 8,8 m/s.

Figura 5 – Rosa dos ventos.



Em seguida, os dados meteorológicos levantados foram manipulados para um formato compatível ao processador AERMET, visto que os dados devem estar em um formato correto para a entrada no modelo.

A preparação do processador AERMET é composta por três estágios, o primeiro estágio, cujo objetivo é realizar a análise da consistência dos dados levantados, necessita dos dados meteorológicos e de sondagem em formato adequado, como também informações de localização da estação meteorológica utilizada, e o período de tempo avaliado.

O segundo estágio tem como objetivo mesclar os dados de sondagem levantados, e para esta etapa foram utilizados dados gerados no processamento do primeiro estágio.

Por fim, o terceiro estágio visa calcular parâmetros da atmosfera como a turbulência. Neste estágio foram necessários os seguintes dados de entrada: albedo, razão de Bowen e rugosidade da região em estudo. Para tanto, fez-se uma análise detalhada do uso do solo em uma circunferência de 5 km de raio a partir da pedreira. Com o auxílio do software Qgis e imagens de satélite, foram delimitadas áreas de água, areia, floresta, grama e urbanização

presentes dentro da área definida pela circunferência (Figura 6). Os cálculos foram realizados para as quatro estações do ano onde as informações de albedo, razão de Bowen e rugosidade foram associadas. A Tabela 5 mostra os resultados dos parâmetros avaliados.

Figura 6 – Uso do solo no entorno da pedreira.

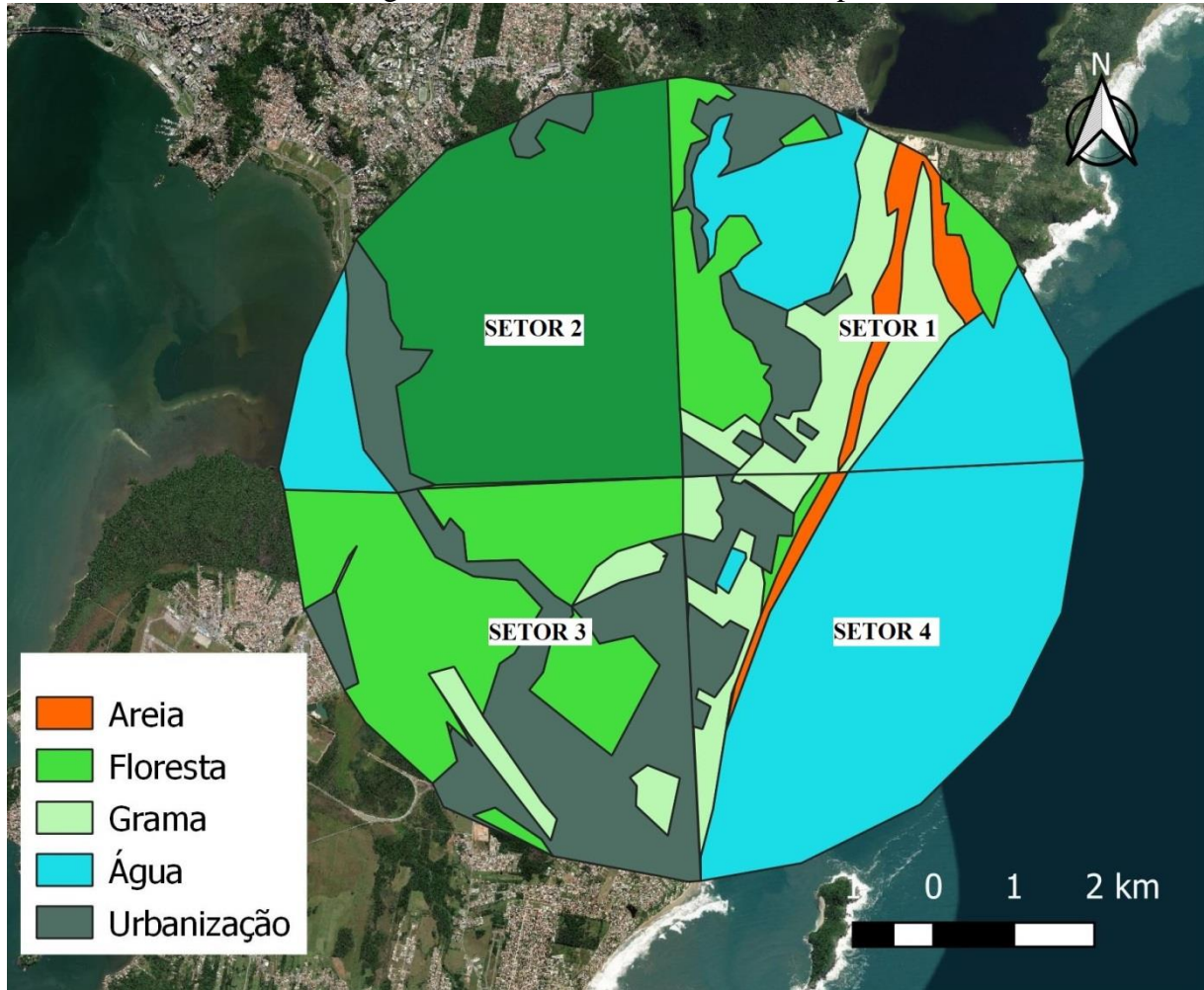


Tabela 5 – Resultados dos parâmetros calculados.

Estação do ano	Setor	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade
Verão	1	0,1444	0,8920	0,438
	2	0,1231	0,4946	1,139
	3	0,1403	0,9853	1,083
	4	0,1168	0,4060	0,108
Outono	1	0,1667	1,2069	0,330
	2	0,1294	1,0404	0,749
	3	0,1496	1,3776	0,807
	4	0,1520	0,4786	0,094

Estação do ano	Setor	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade
Inverno	1	0,1583	0,9120	0,346
	2	0,1260	0,8216	0,827
	3	0,1412	1,0557	0,862
	4	0,1418	0,3743	0,095
Primavera	1	0,1278	0,4134	0,352
	2	0,1225	0,6808	0,905
	3	0,1328	0,7873	0,918
	4	0,1316	0,2711	0,099

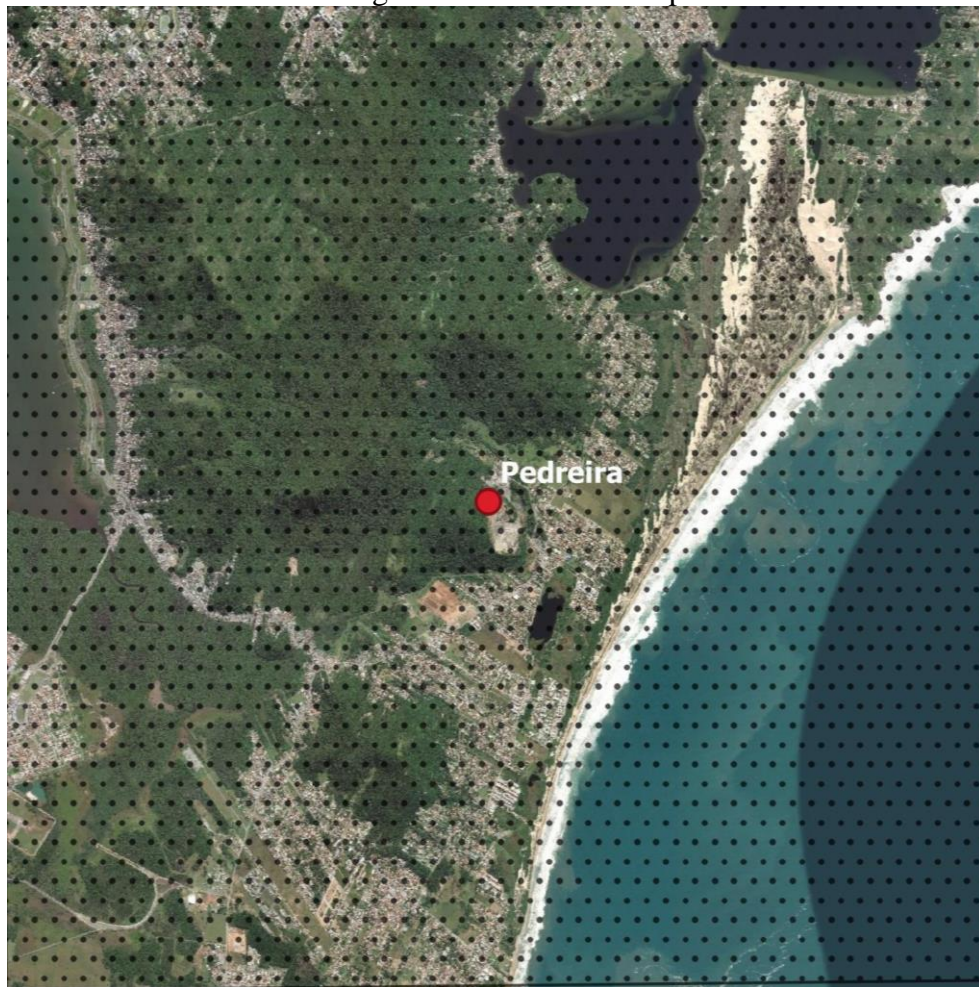
3.3.2 Dados Topográficos

Para a avaliação de dispersão da pluma de poluentes em consequência das características do terreno foi utilizado o processador AERMAP. Este processador requer mapas digitais de elevação (MDE) como dados de entrada. Desta forma, foi obtido um MDE centralizado na área da pedreira, com dimensões de 10 x 10km, gerado a partir de dados SRTM (Suttle Radar Topography Mission).

Também, para o modelo foi definida uma grade de receptores (Figura 7) cobrindo toda a dimensão do MDE (10 x10km). Assim, optou-se por 100 receptores espaçados a cada 100 metros. A seguir são apresentadas as principais informações da grade cartesiana considerada para este trabalho:

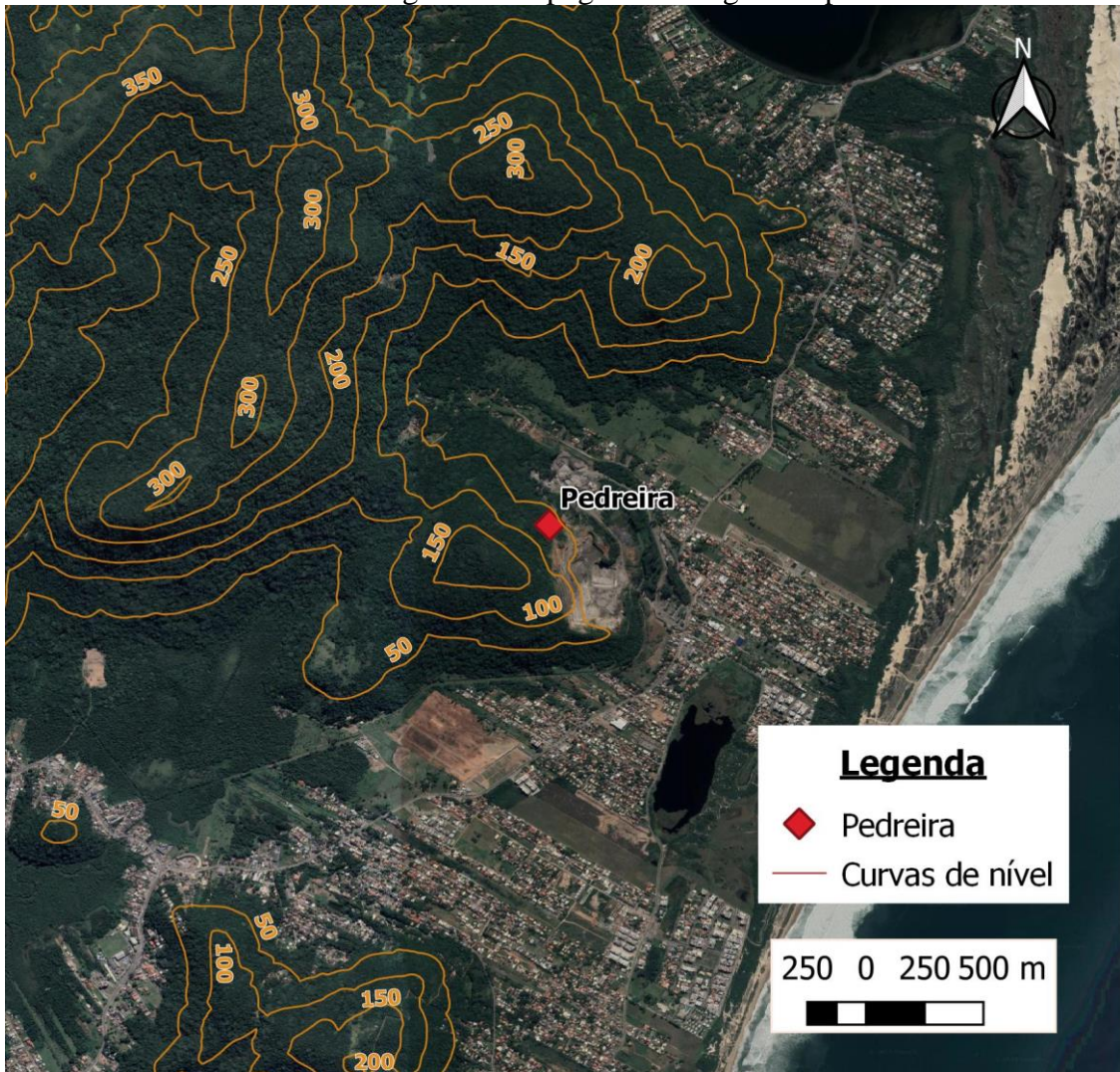
- Coordenadas centrais (UTM): 738300, 6929519
- Dimensões da grade de receptores: 10 x 10km
- Número de receptores (x/y): 100/100
- Espaçamento entre os pontos (x/y): 100/100m
- Número total de receptores: 10.000

Figura 7 - Grade de Receptores



A fim de avaliar o comportamento da pluma de poluentes emitidos na atmosfera, foram analisadas as características do relevo da área em que a pedreira está situada. A Figura 8 mostra a topografia da região em estudo. As curvas de nível mostram que há relevos elevados ao oeste e norte da pedreira, já em toda porção leste e sul há baixas altitudes devido à proximidade com o oceano.

Figura 8 - Topografia da região da pedraira.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VIAS NÃO PAVIMENTADAS

Para as vias não pavimentadas foram simuladas as concentrações em três cenários, sendo o primeiro de valores de concentrações mínimas, o segundo de concentrações médias e o terceiro de máximas, conforme o teor de silte utilizado no cálculo das taxas de emissão. As Tabelas na sequência apresentam os dez maiores valores de concentração para cada cenário (mínimo, médio e máximo) no período de 24 horas, assim como o percentual dos resultados comparados com o padrão final (PF) de qualidade do ar estabelecido pela legislação CONAMA 491/2018.

Tabela 6 – Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o primeiro cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.

Rank	MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	3,53 (14%)	40,53 (81%)	458,20 (191%)
2	2,91 (12%)	34,56 (69%)	390,73 (163%)
3	2,55 (10%)	29,81 (60%)	337,06 (140%)
4	2,46 (10%)	29,50 (59%)	333,58 (139%)
5	2,44 (10%)	29,00 (58%)	327,87 (137%)
6	2,44 (10%)	28,11 (56%)	317,81 (132%)
7	2,42 (10%)	27,64 (55%)	312,59 (130%)
8	2,32 (9%)	27,57 (55%)	311,70 (130%)
9	2,32	26,85	303,55

Rank	MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	(9%)	(54%)	(126%)
10	2,29	26,24	296,69
	(9%)	(52%)	(124%)

Tabela 7 - Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o segundo cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.

Rank	MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	14,80 (59%)	146,15 (292%)	1299,41 (541%)
2	12,63 (51%)	124,63 (249%)	1061,21 (442%)
3	10,90 (44%)	107,51 (215%)	915,44 (381%)
4	10,80 (43%)	106,40 (213%)	905,98 (377%)
5	10,60 (42%)	104,58 (209%)	890,47 (371%)
6	10,28 (41%)	101,37 (203%)	863,17 (360%)
7	10,09 (40%)	99,71 (199%)	848,97 (354%)
8	10,08 (40%)	99,42 (199%)	846,97 (353%)
9	9,80 (39%)	96,83 (194%)	824,42 (344%)
10	9,59 (38%)	94,63 (189%)	805,80 (336%)

Tabela 8 - Maiores concentrações encontradas em um período de 24 horas para o terceiro cenário, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.

Rank	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	22,99 (92%)	223,24 (446%)	1729,15 (720%)
2	19,63 (79%)	190,38 (381%)	1474,57 (614%)
3	16,93 (68%)	164,23 (328%)	1272,03 (530%)
4	16,78 (67%)	162,53 (325%)	1258,88 (525%)
5	16,48 (66%)	159,75 (320%)	1237,33 (516%)
6	15,99 (64%)	154,85 (310%)	1199,38 (500%)
7	15,68 (63%)	152,30 (305%)	1179,67 (492%)
8	15,68 (63%)	151,87 (304%)	1176,33 (490%)
9	15,21 (61%)	147,89 (296%)	1145,56 (477%)
10	14,89 (60%)	144,56 (289%)	1119,68 (467%)

Como observado nas tabelas acima, os resultados de MP_{2,5} estão de acordo com a legislação nos três cenários apresentados, dado que os resultados se encontram abaixo dos padrões mais restritivos estabelecidos pela legislação. Em contrapartida, o poluente MP₁₀ não apresentou resultados tão favoráveis quando comparados aos de MP_{2,5}.

O poluente MP₁₀ obteve resultados abaixo do padrão final (PF) de qualidade do ar no primeiro cenário, estando assim de acordo com a legislação CONAMA 491/2018. Já nos cenários de concentrações médias e máximas, constataram-se violações em relação aos padrões de qualidade do ar, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Violações aos padrões de qualidade do ar do poluente MP₁₀ para o segundo e terceiro cenário.

Padrões de qualidade do ar	Concentrações máximas permitidas (µg/m³)	Número de violações no segundo cenário	Número de violações no terceiro cenário
PI-1	120	2	49
PI-2	100	7	143
PI-3	75	69	675
PF	50	617	2851

Por fim, as concentrações do poluente PTS encontradas se apresentaram acima dos valores estabelecidos pela legislação em todos os cenários. No primeiro cenário houve 52 violações aos padrões de qualidade do ar, onde o valor máximo permitido é de 240 µg/m³, no segundo cenário foram 4182 violações, e no terceiro cenário (concentrações máximas), foram 7794 violações.

Vale salientar, que as maiores concentrações encontradas para todos os poluentes e cenários citados acima ocorreram no dia 15/06/2016.

As plumas de dispersão dos três cenários foram sobrepostas, a fim de serem geradas figuras mostrando a dispersão e as concentrações encontradas para cada poluente, nos períodos de 24 horas e 1 ano, tais figuras podem ser vistas a seguir.

Figura 9 - Pluma de dispersão de MP2.5 emitida por vias não pavimentadas

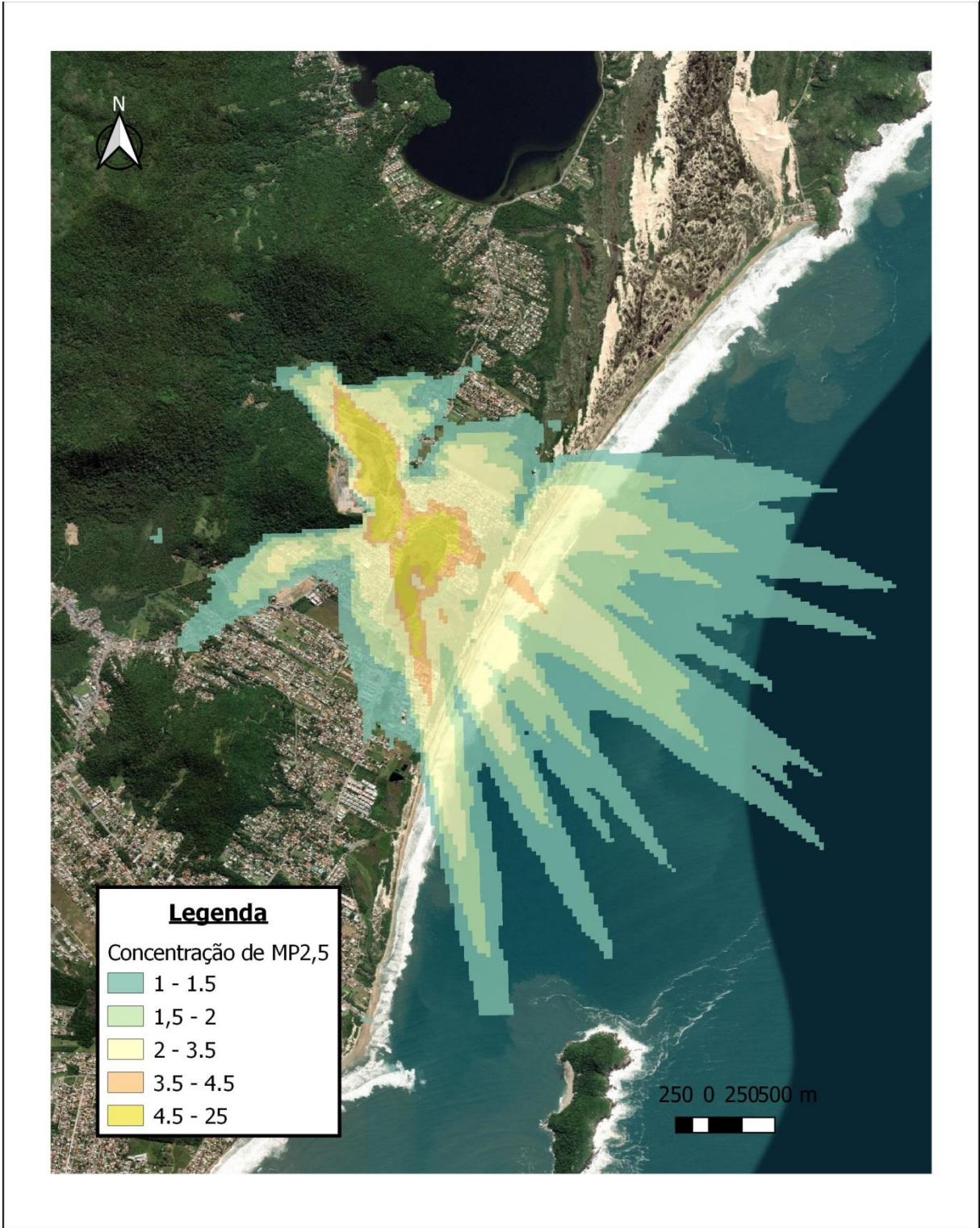


Figura 10 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.

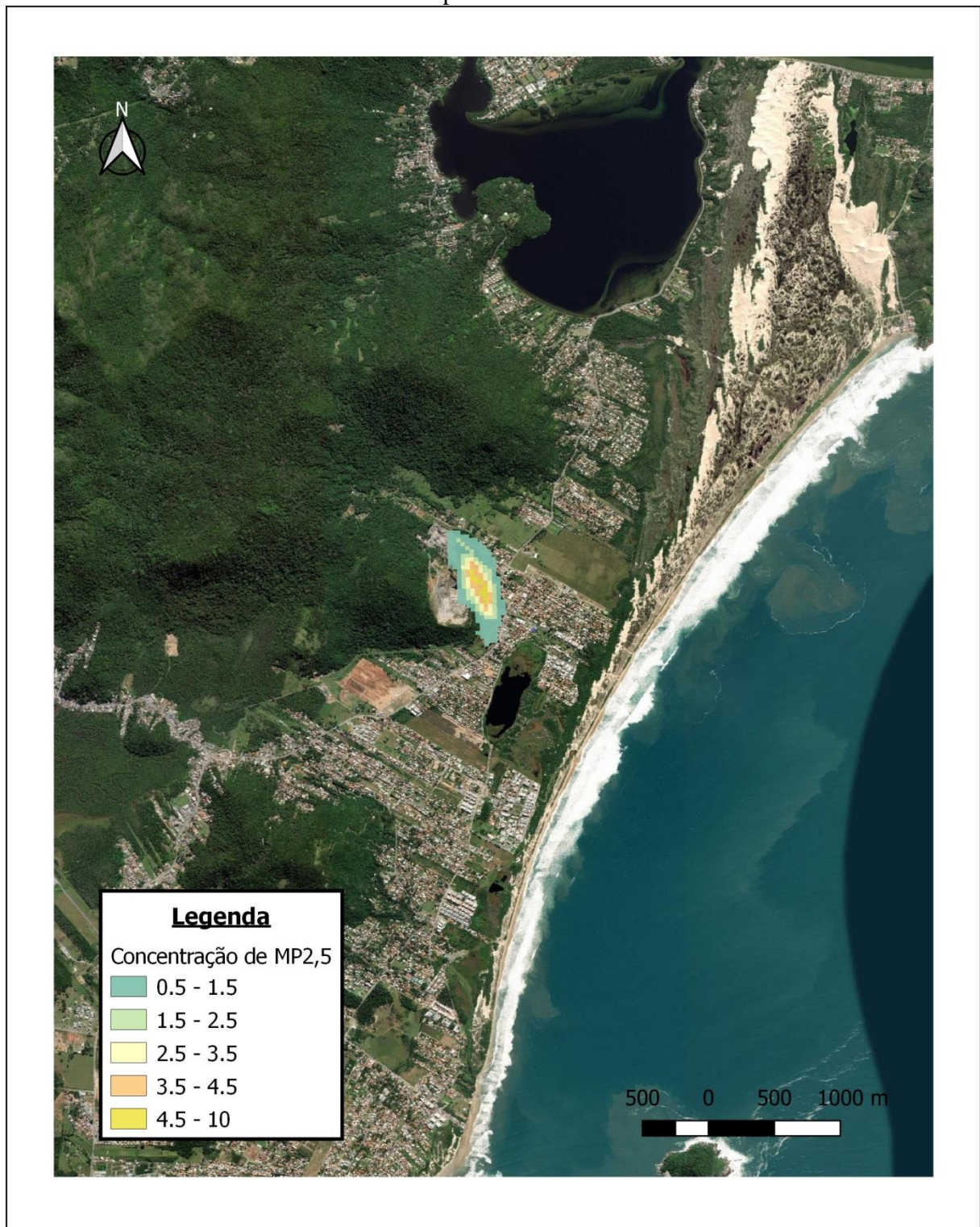


Figura 11 - Pluma de dispersão de MP₁₀ emitida por vias não pavimentadas, em um período de 24 horas.

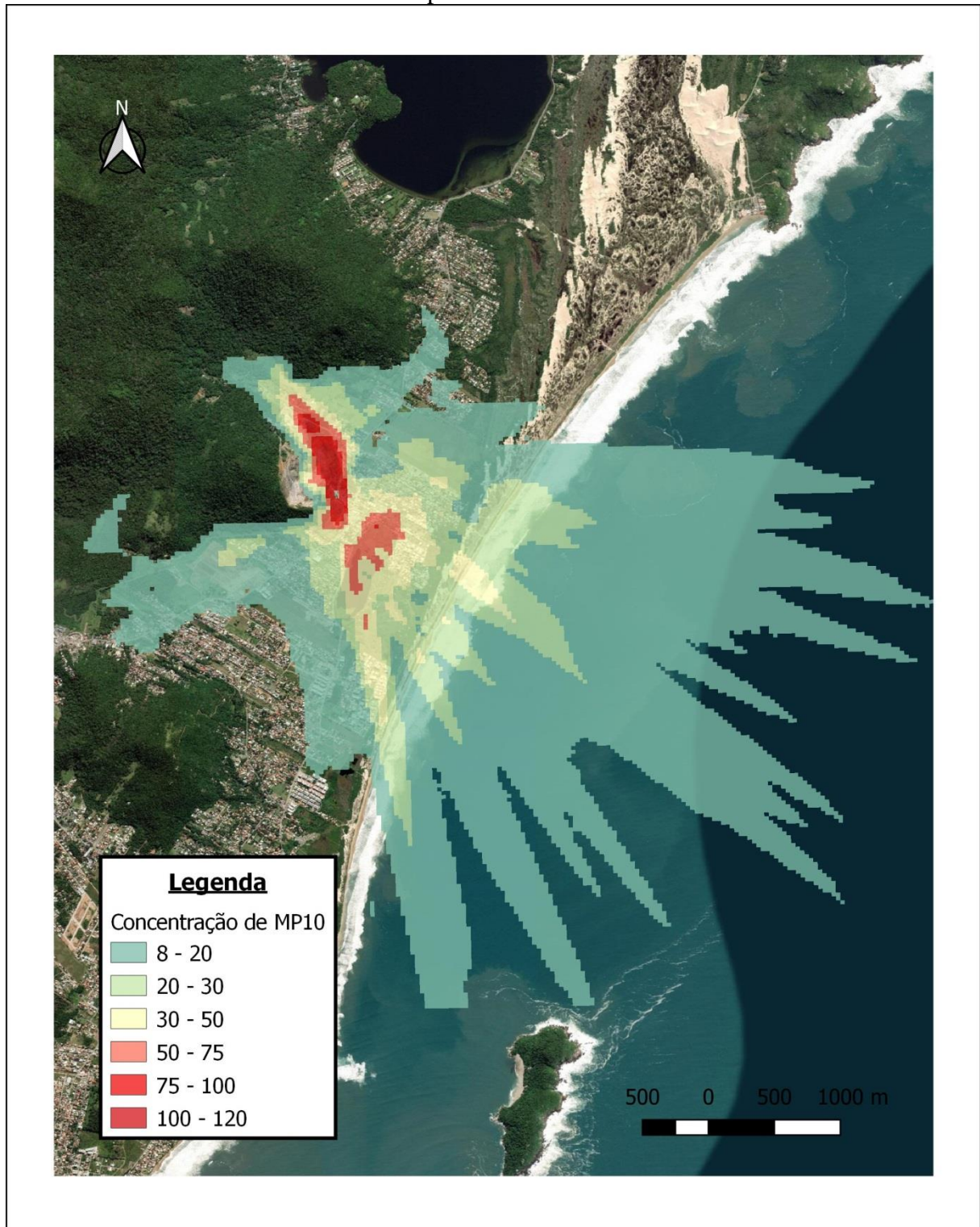


Figura 12 - Pluma de dispersão de MP₁₀ emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.

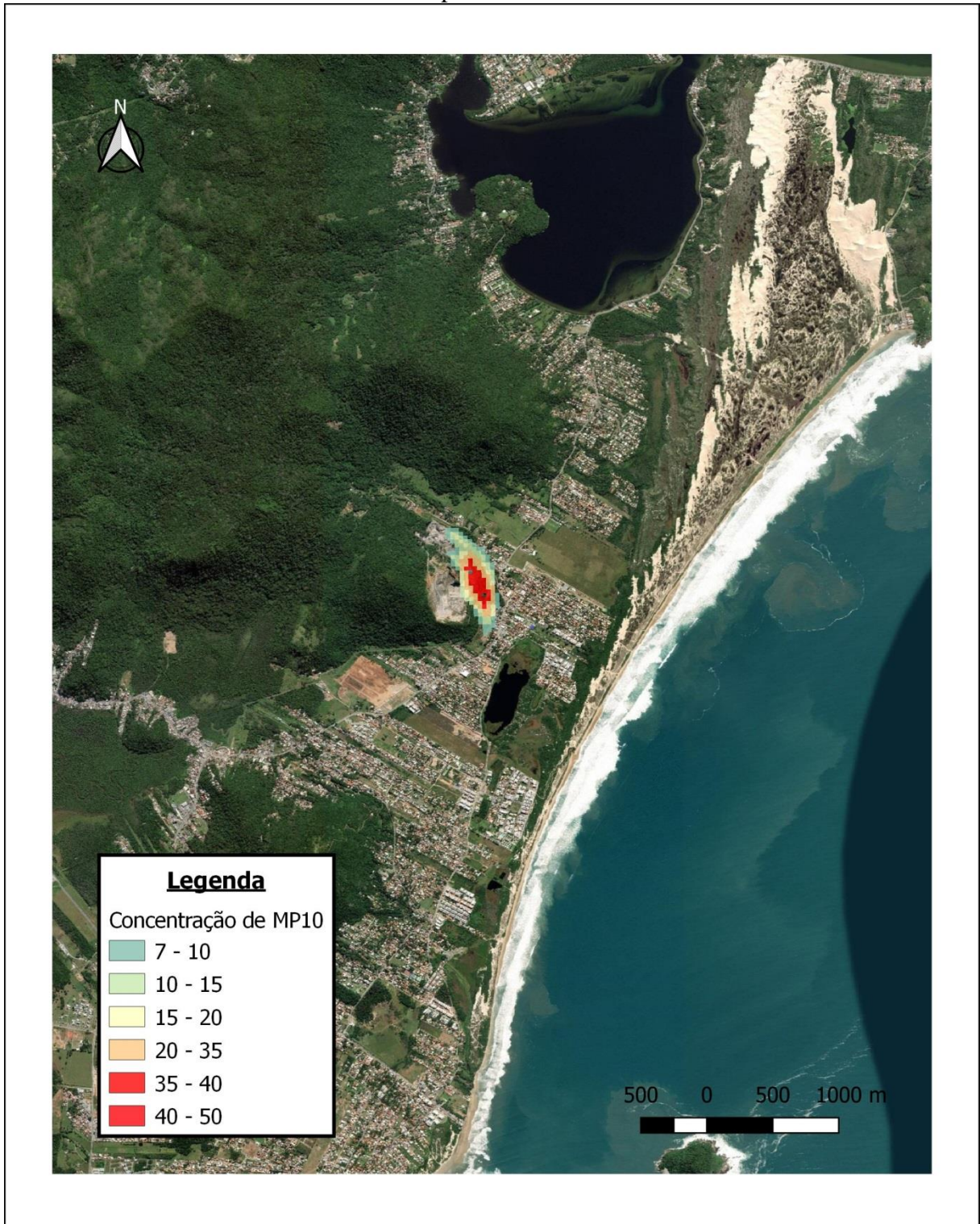


Figura 13 - Pluma de dispersão de PTS emitida por vias não pavimentadas, em um período de 24 horas.

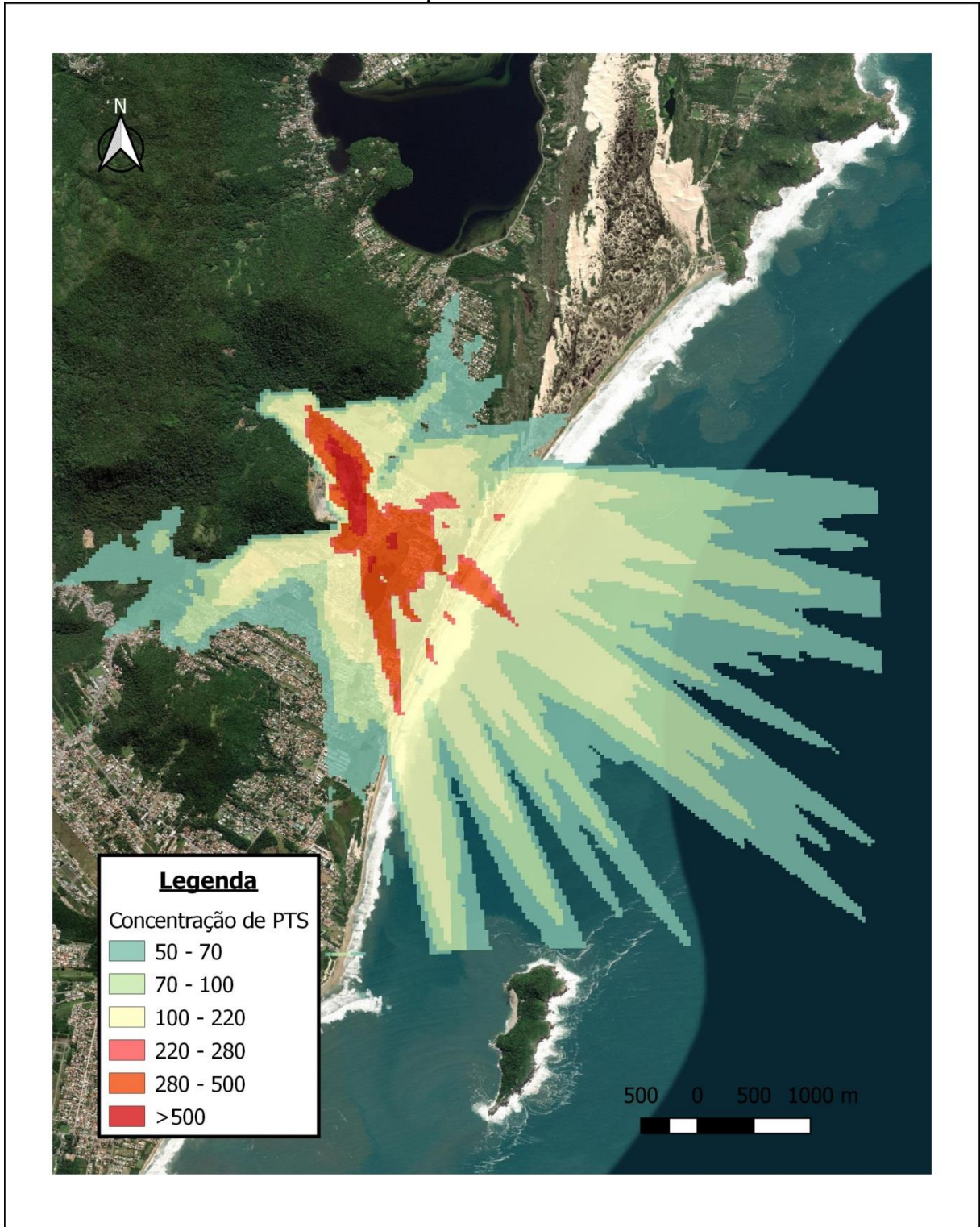
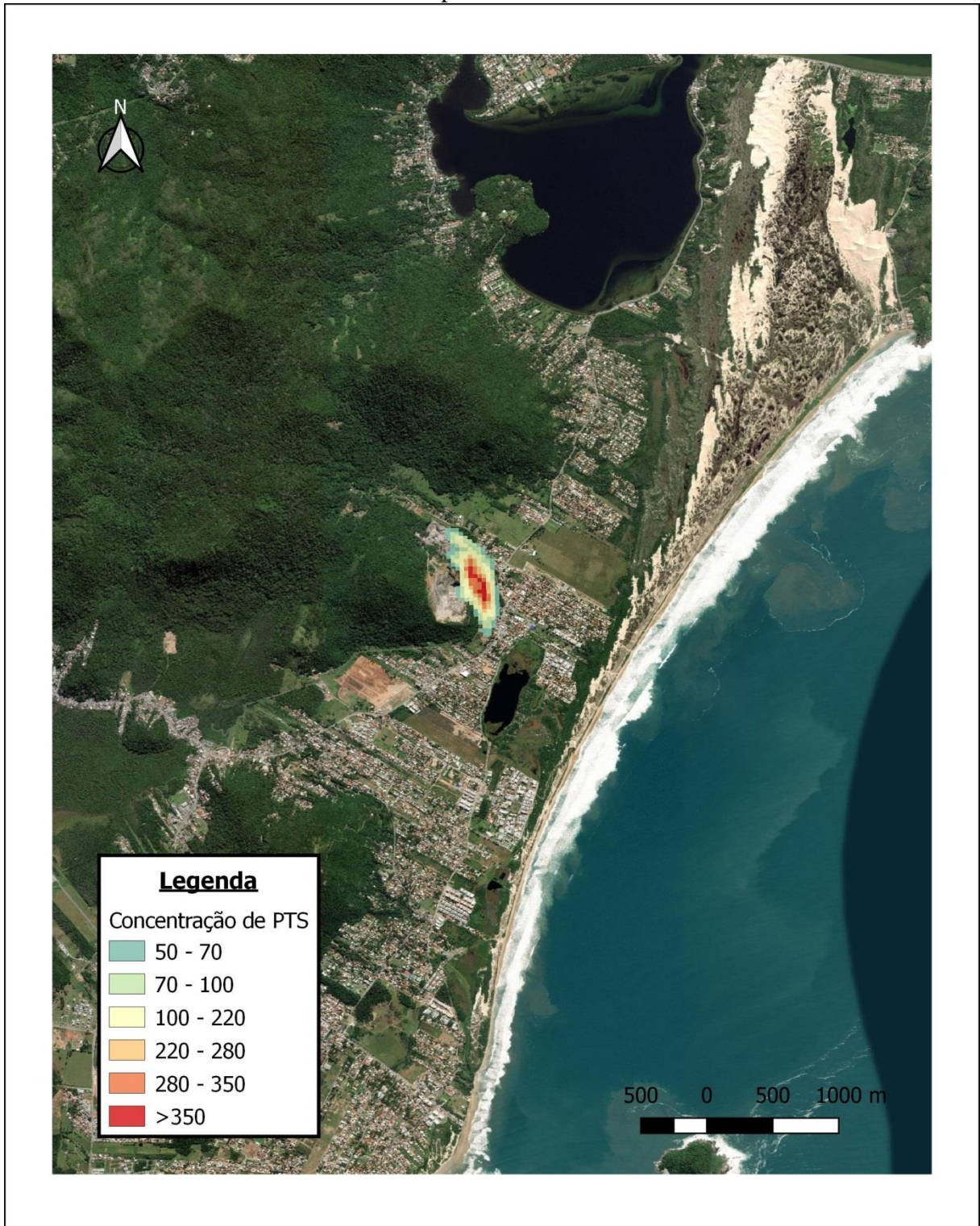


Figura 14 - Pluma de dispersão de PTS emitida por vias não pavimentadas, em um período de 1 ano.



4.2 DEPÓSITOS DE MATERIAL A CÉU ABERTO

A Tabela 10 apresenta os dez maiores valores de concentração encontrados (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para cada poluente analisado em relação às emissões dos depósitos de material a céu aberto. Também, compara os resultados com os valores do padrão final (PF) de qualidade do ar da legislação CONAMA 471/2018. Na sequência, podem ser vistas figuras que mostram as plumas de dispersão dos poluentes juntamente com as concentrações encontradas para os períodos de 24 horas e anual.

Tabela 10 - Maiores concentrações encontradas para cada poluente, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.

Rank	MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	4,02 (16%)	28,36 (56%)	51,06 (21%)
2	3,54 (14%)	24,89 (50%)	43,99 (18%)
3	3,34 (13%)	24,80 (50%)	41,48 (17%)
4	3,26 (13%)	24,72 (50%)	39,71 (17%)
5	3,25 (13%)	23,88 (48%)	38,27 (16%)
6	3,18 (13%)	22,86 (46%)	36,53 (15%)
7	3,17 (13%)	22,38 (45%)	36,37 (15%)
8	3,16 (13%)	22,04 (44%)	36,19 (15%)
9	3,13 (13%)	21,70 (43%)	36,09 (15%)
10	3,06 (13%)	21,49 (43%)	35,77 (15%)

As maiores concentrações dos poluentes analisados, como apresentado na primeira linha da tabela acima ocorreram todas no dia 04/06/2016. Também, como observado na tabela as concentrações encontradas para a fonte de pilhas de materiais estão de acordo com a legislação CONAMA 491/2018, visto que os resultados possuem valores abaixo dos mais restritivos estabelecidos pela legislação para todos os poluentes analisados.

Comparando os resultados obtidos com o estudo de Abril et al. (2015) presente no item 2.4 deste trabalho, observa-se que a concentração máxima encontrada de PTS é consideravelmente menor que o valor apresentado no estudo citado, que é $2.500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta discrepância pode ter ocorrido devido ao teor de umidade das pilhas, visto que Abril et al (2015) utilizou um teor de umidade de 0,25%, enquanto que para este estudo foi usado 2,1%. Além disto, outros parâmetros como tamanho das pilhas e material processado também influenciam na diferença dos resultados.

Figura 15 - Pluma de dispersão de MP_{2,5} emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.

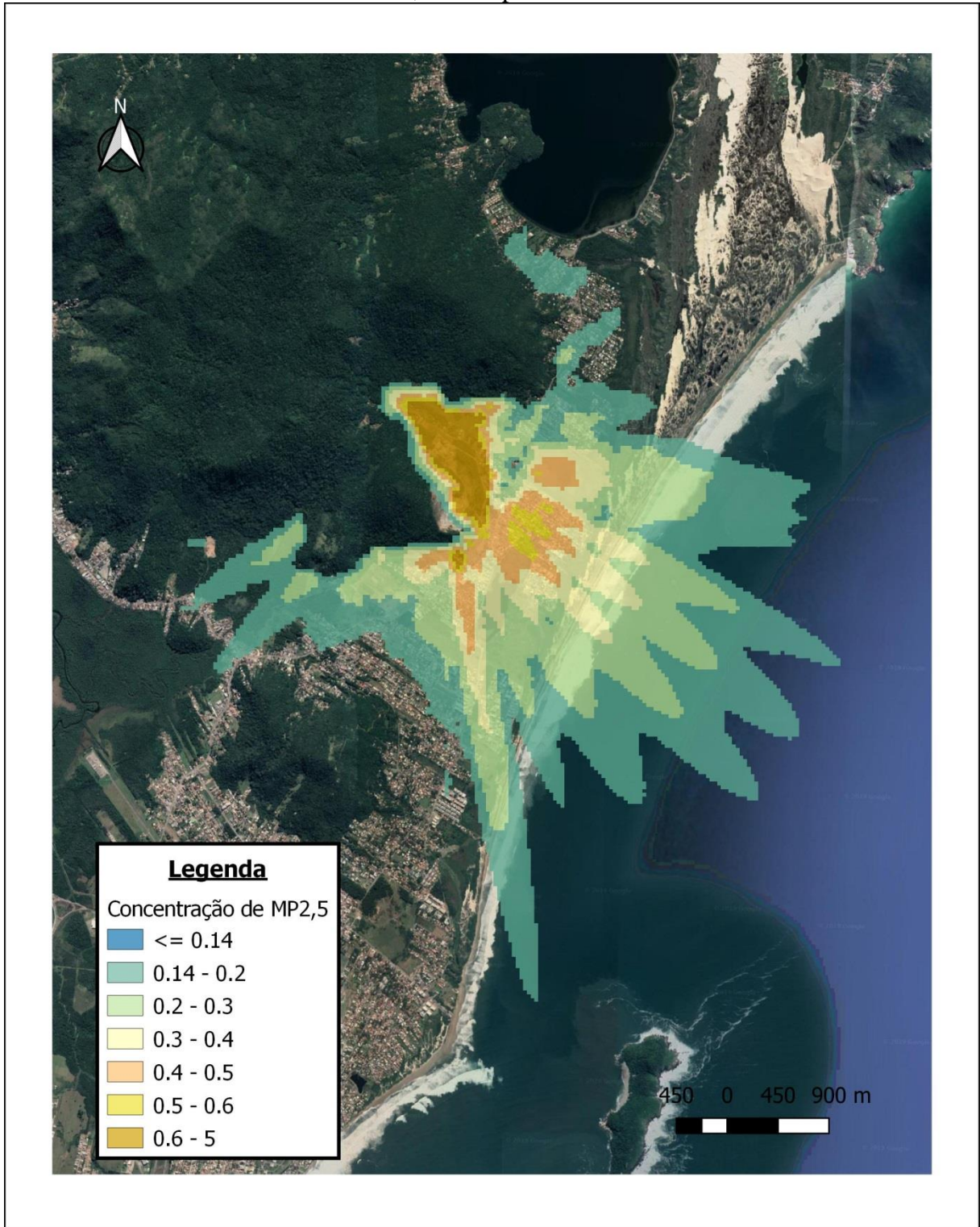


Figura 16 - Pluma de dispersão de MP_{2,5} emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.

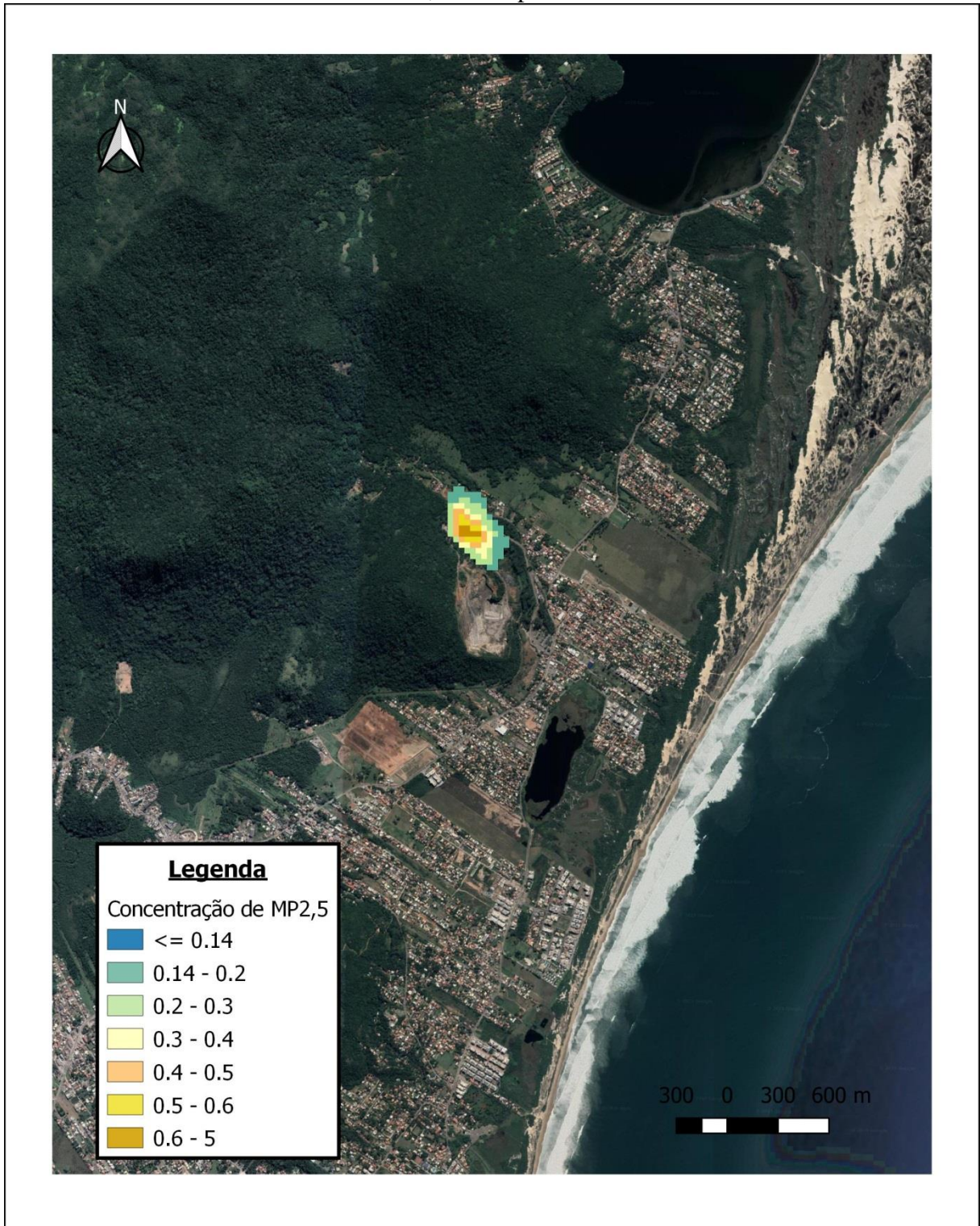


Figura 17 - Pluma de dispersão de MP₁₀ emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.

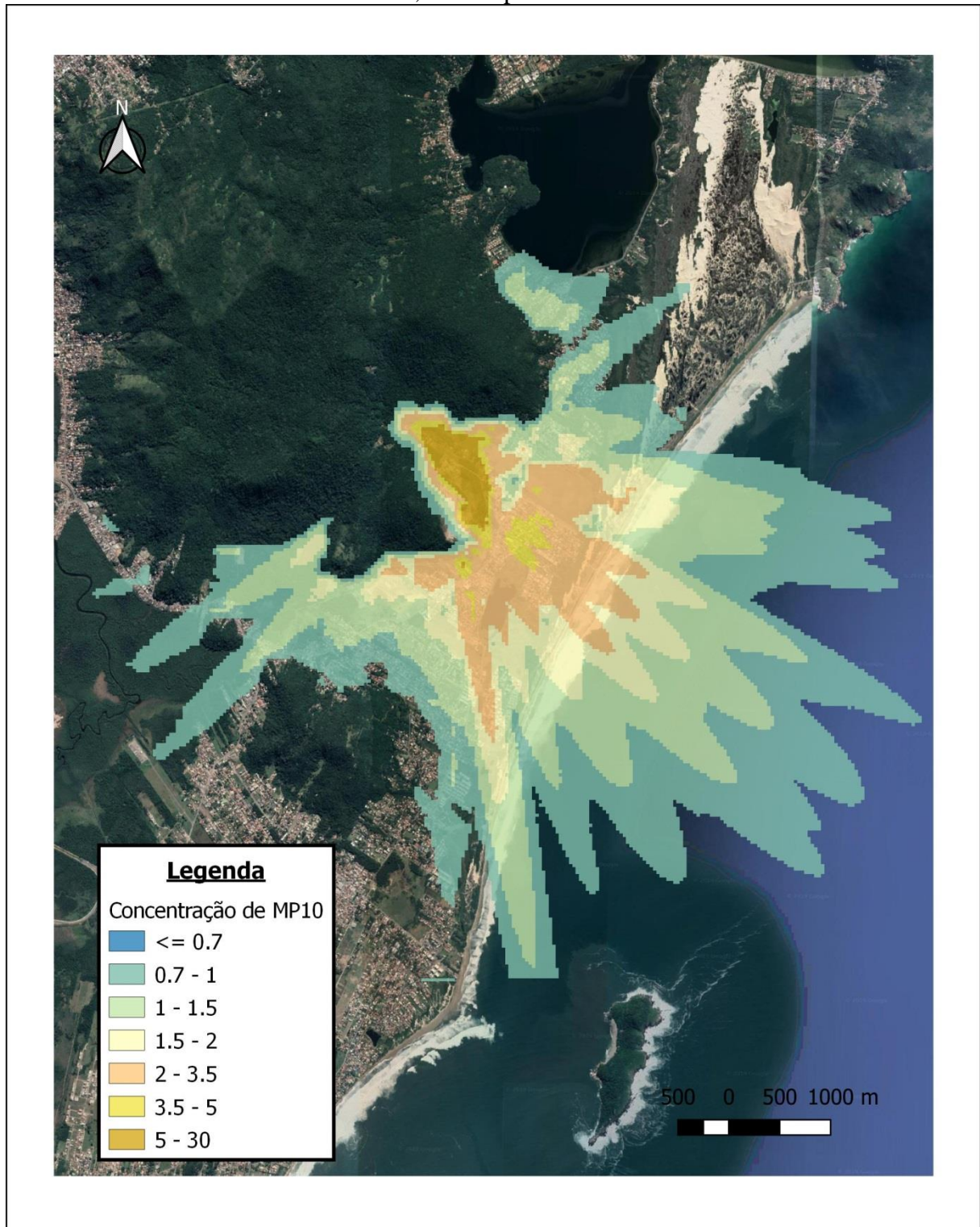


Figura 18 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.

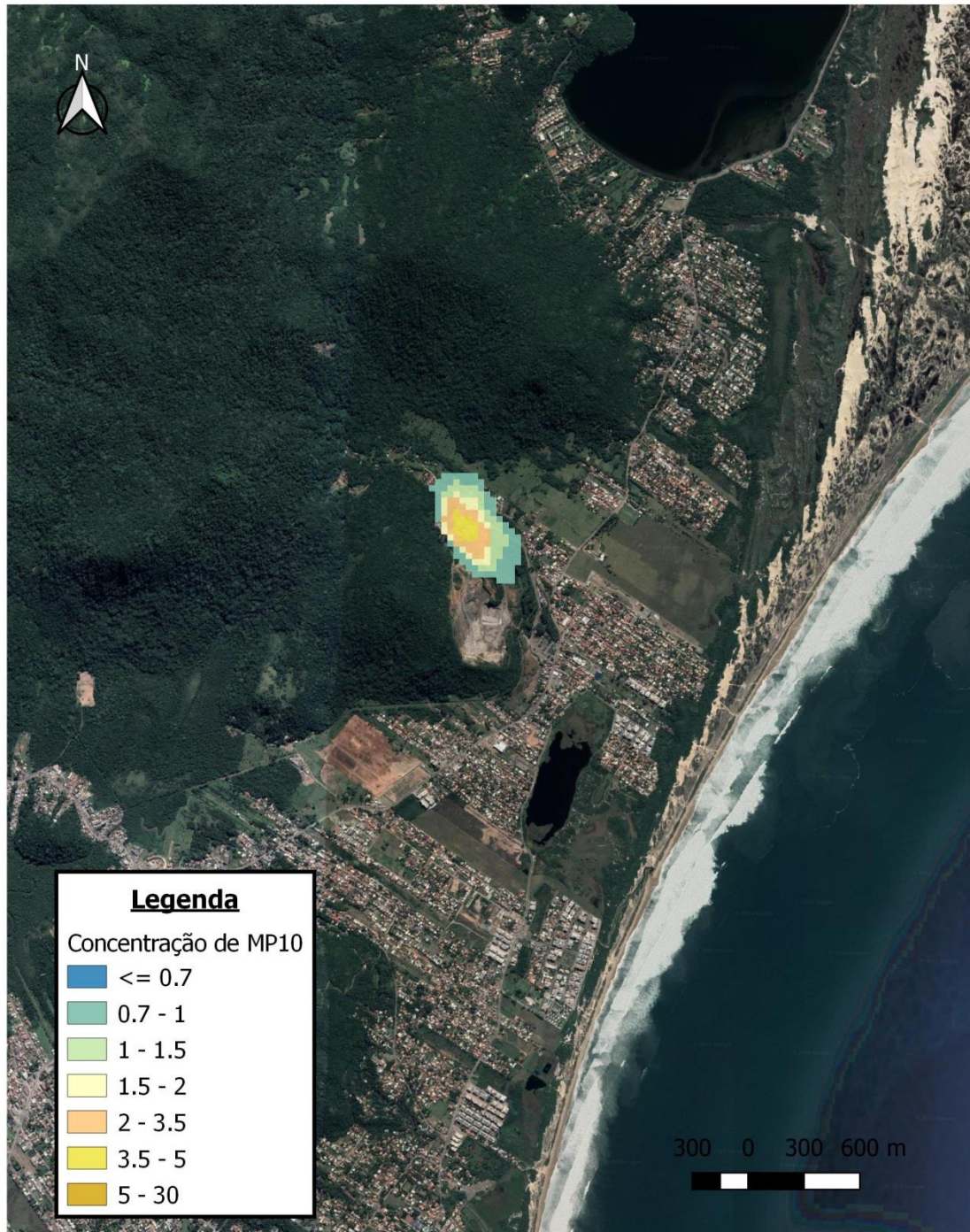


Figura 19 - Pluma de dispersão de PTS emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 24 horas.

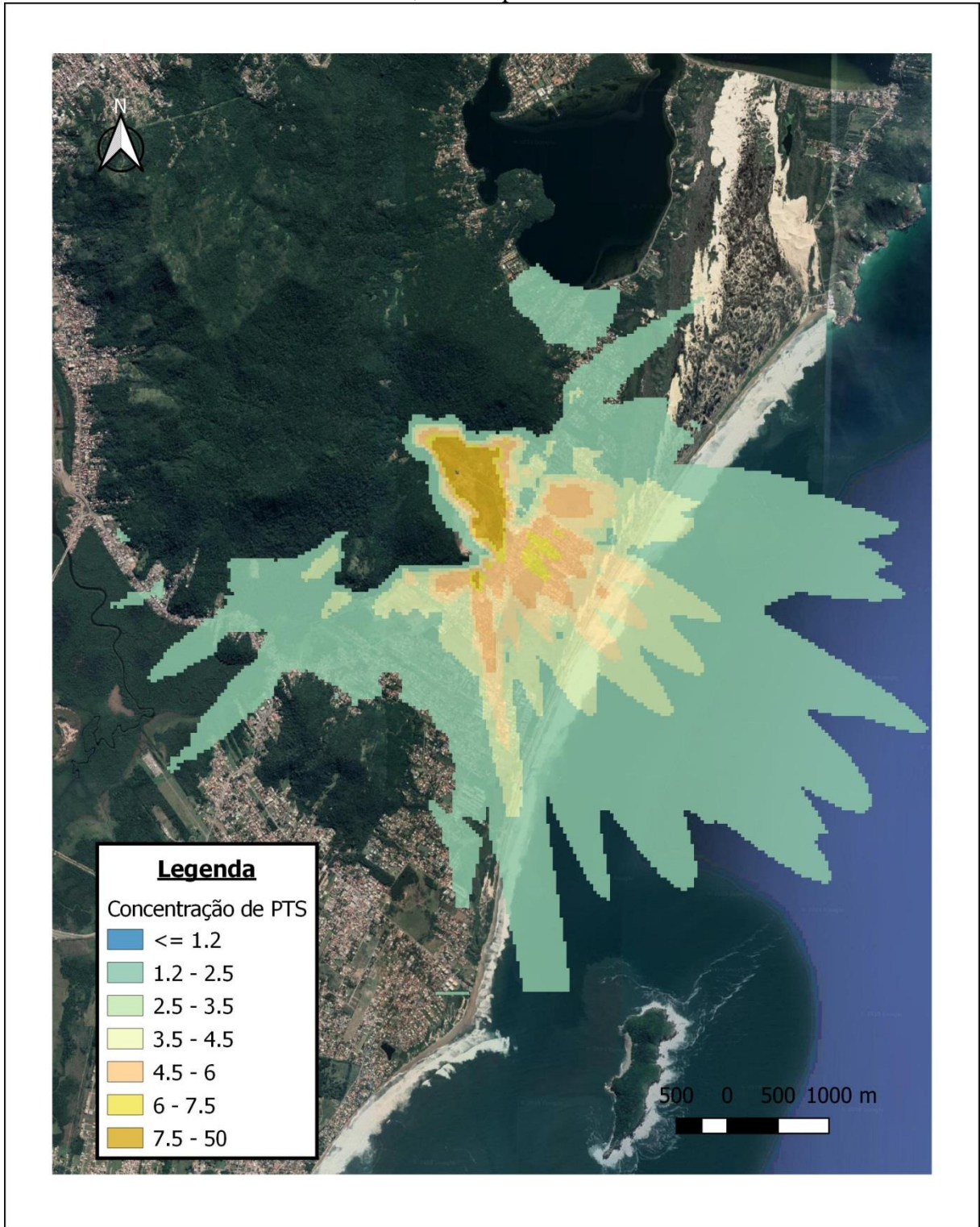
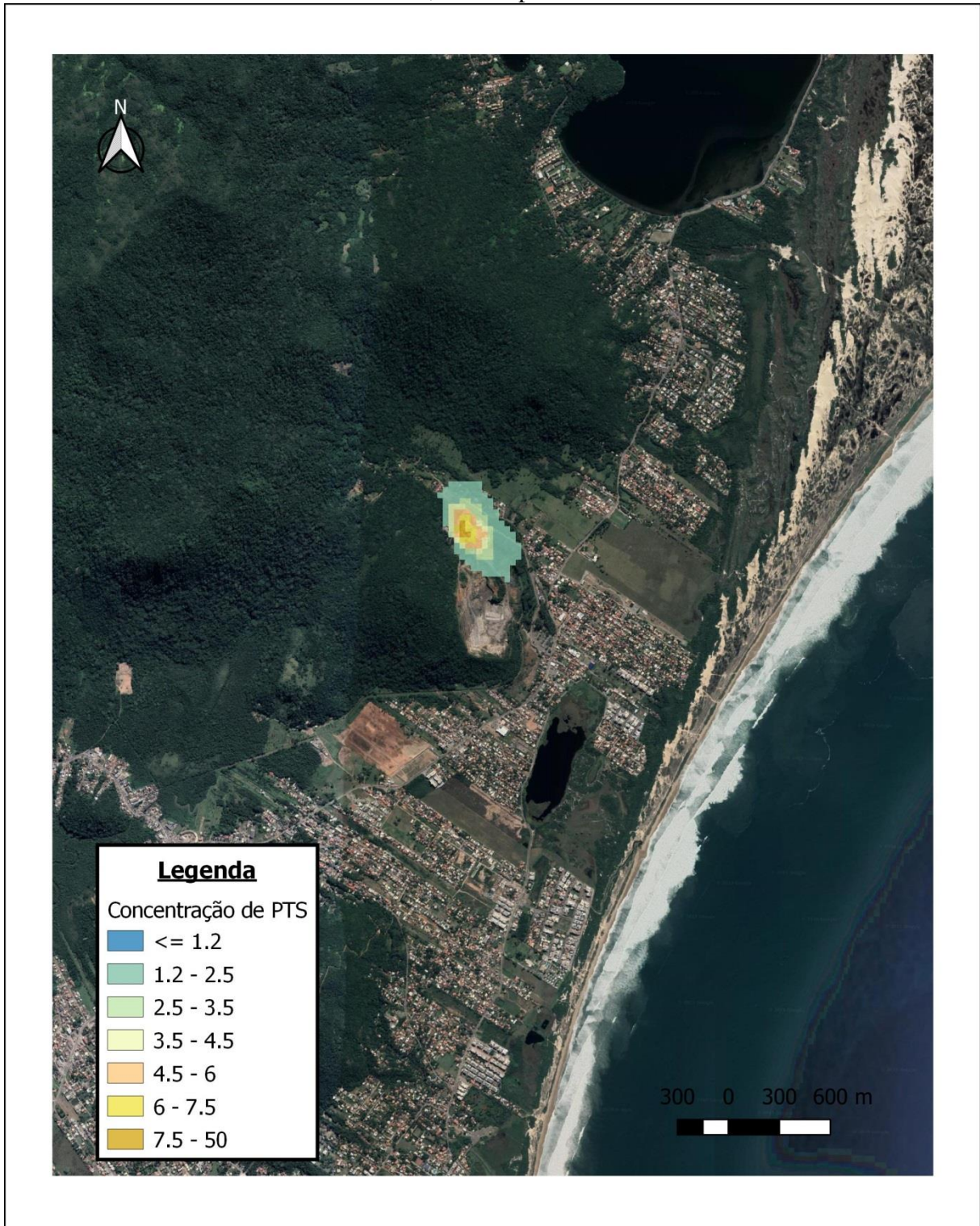


Figura 20 - Pluma de dispersão de PTS emitida por depósitos de materiais a céu aberto, em um período de 1 ano.



4.3 DISPERSÃO TOTAL

A modelagem de qualidade do ar foi realizada para as duas fontes de emissão, depósitos de material a céu aberto e vias não pavimentadas, em conjunto. Os resultados das dez maiores concentrações encontradas para cada poluente, juntamente com o comparativo com o PF de qualidade do ar estabelecido pela legislação CONAMA 491/2018 podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 11 - Maiores concentrações encontradas para cada poluente das fontes em conjunto, seguidas da porcentagem do padrão de qualidade do ar.

Rank	MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	14,90 (59%)	146,84 (294%)	1245,53 (519%)
2	12,67 (51%)	124,90 (250%)	1061,63 (442%)
3	10,93 (44%)	107,80 (216%)	915,89 (382%)
4	10,81 (43%)	106,54 (213%)	906,22 (378%)
5	10,78 (43%)	104,99 (210%)	891,12 (371%)
6	10,66 (43%)	104,52 (209%)	863,40 (360%)
7	10,30 (41%)	101,51 (203%)	854,89 (356%)
8	10,16 (41%)	100,17 (200%)	849,67 (354%)
9	9,93 (40%)	97,78 (196%)	825,93 (344%)
10	9,88 (40%)	96,66 (193%)	805,97 (336%)

De acordo com a tabela acima, as concentrações do poluente MP_{2,5} se mantiveram abaixo dos valores estabelecidos pela legislação. Desta forma, pode-se dizer que as emissões de MP_{2,5} emitidas pela pedreira se encontram de acordo com a legislação CONAMA 491/2018.

Quando analisadas as concentrações de MP₁₀ encontradas no período de 24 horas, foram identificadas violações em relação aos parâmetros de qualidade do ar. A Tabela 12 apresenta o número de violações encontradas para os padrões PI-1, PI-2, PI-3 e PF.

Tabela 12 - Violações das concentrações de MP₁₀ em relação aos parâmetros de qualidade ao ar

Padrões de qualidade do ar	Concentrações máximas permitidas (µg/m³)	Número de violações
PI-1	120	2
PI-2	100	9
PI-3	75	73
PF	50	669

O poluente PTS também apresentou violações aos padrões de qualidade do ar. Visto que a concentração máxima permitida pela legislação em um período de 24 horas é de 240µg/m³, com a modelagem foram observadas 4226 violações.

As figuras na sequência apresentam as plumas de dispersão de cada poluente, assim como as concentrações encontradas.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 11 e comparando-os com os resultados de cada fonte individualmente pode-se dizer que as vias não pavimentadas é a fonte que mais contribui com o impacto na qualidade do ar pela pedreira.

Devido às altas concentrações de poluentes encontradas, principalmente de MP₁₀ e PTS, medidas mitigadoras devem ser implantadas nas fontes de emissão, a fim de reduzir o impacto causado e evitar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Uma solução para reduzir as concentrações de poluentes emitidos pelas vias não pavimentadas seria o investimento em pavimentação destas vias. As taxas de emissão de vias pavimentadas são relativamente menores que as das vias não pavimentadas, devido aos diferentes parâmetros utilizados nos cálculos, o que inclui as características das partículas dos materiais que constituem cada via.

Outra solução para reduzir o impacto das fontes em pedreiras destaca-se a aspersão por água através de caminhões pipa. Quanto maior o teor de umidade do material menor é a emissão de poluentes, uma vez que a água atua de forma a aglutinar as partículas finas, reduzindo assim sua suspensão. Esta medida serve para ambas as fontes de emissão analisadas neste trabalho.

Figura 21 - Pluma de dispersão de MP_{2,5} emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.

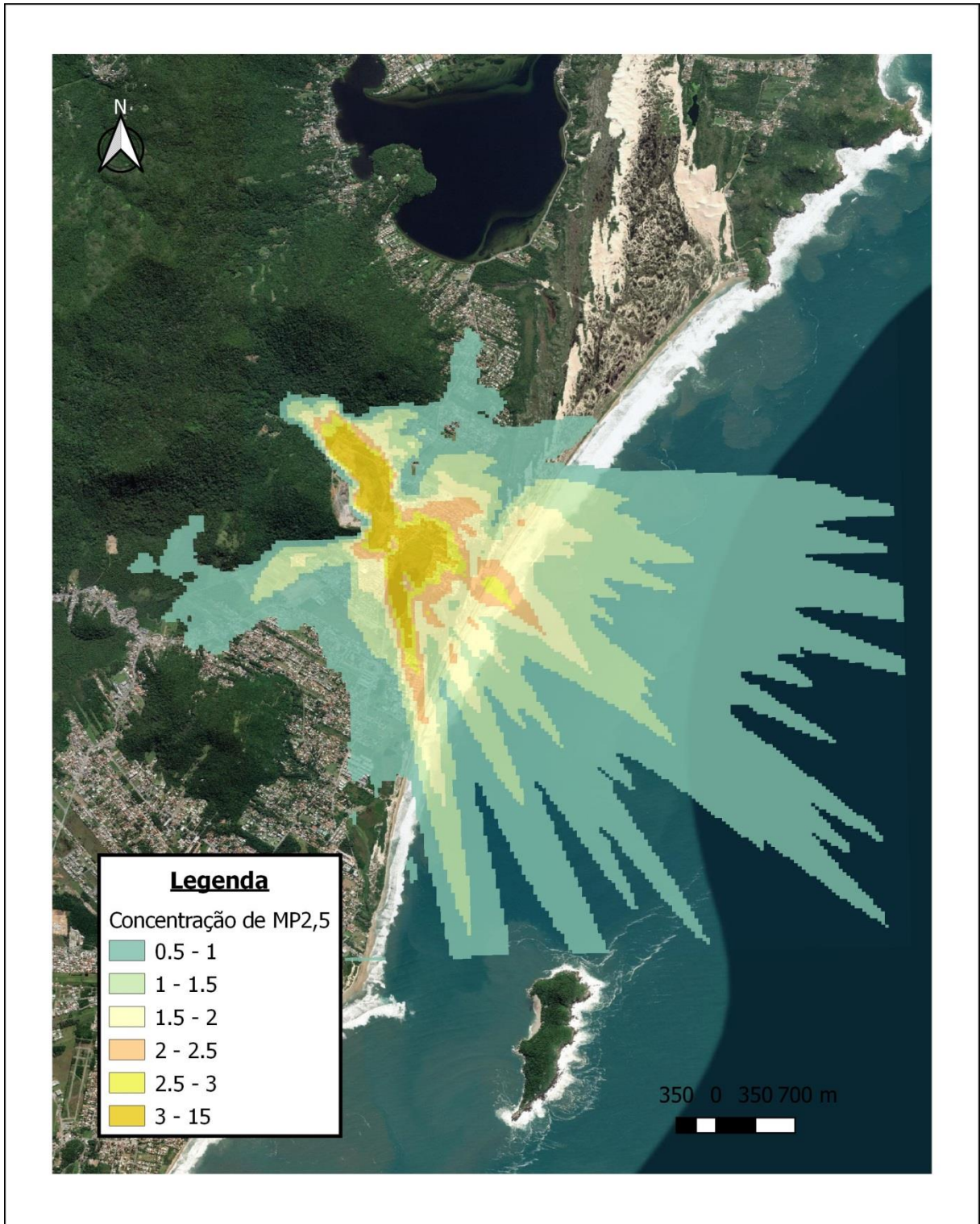


Figura 22 - Pluma de dispersão de MP2,5 emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.

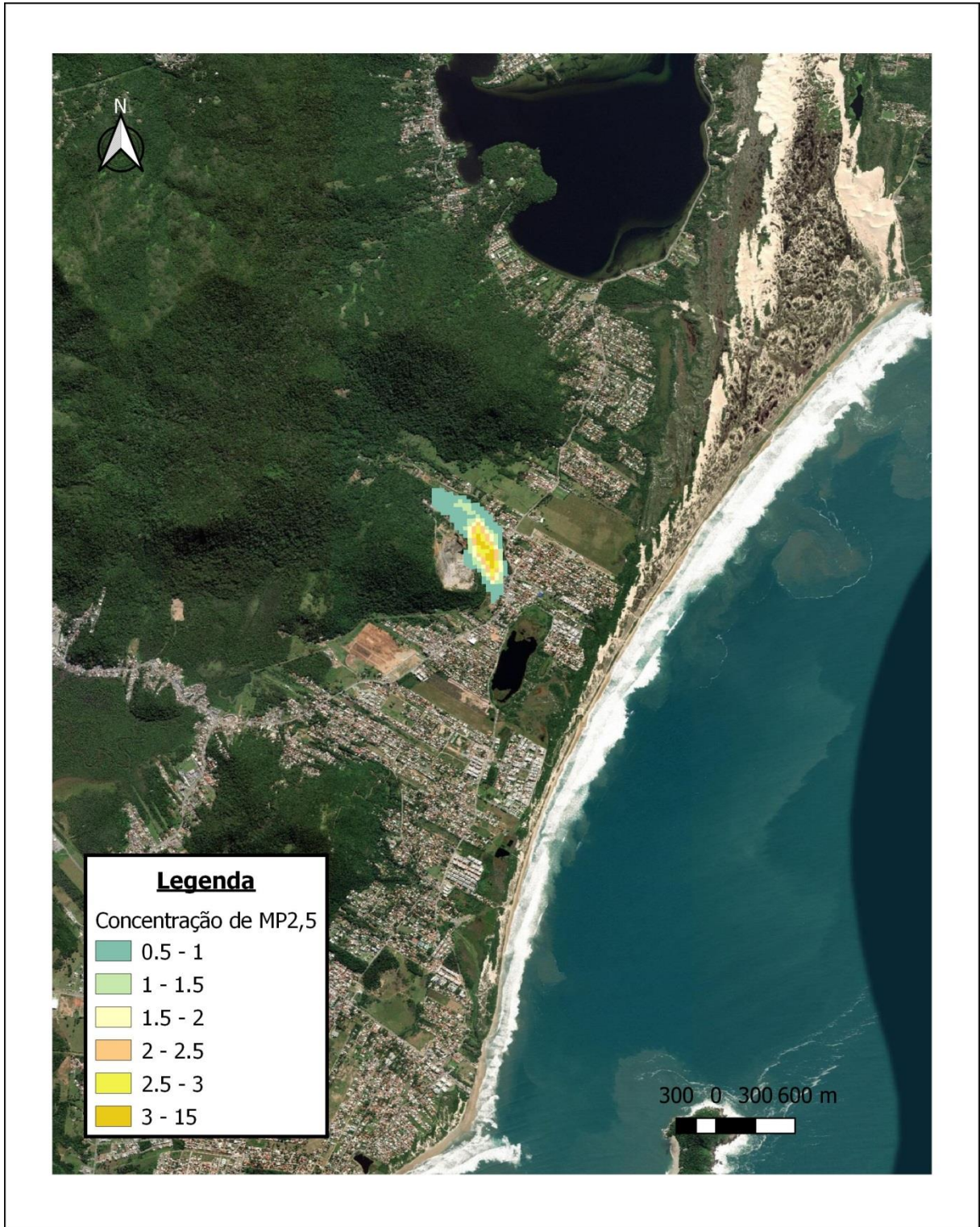


Figura 23 - Pluma de dispersão de MP10 emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.

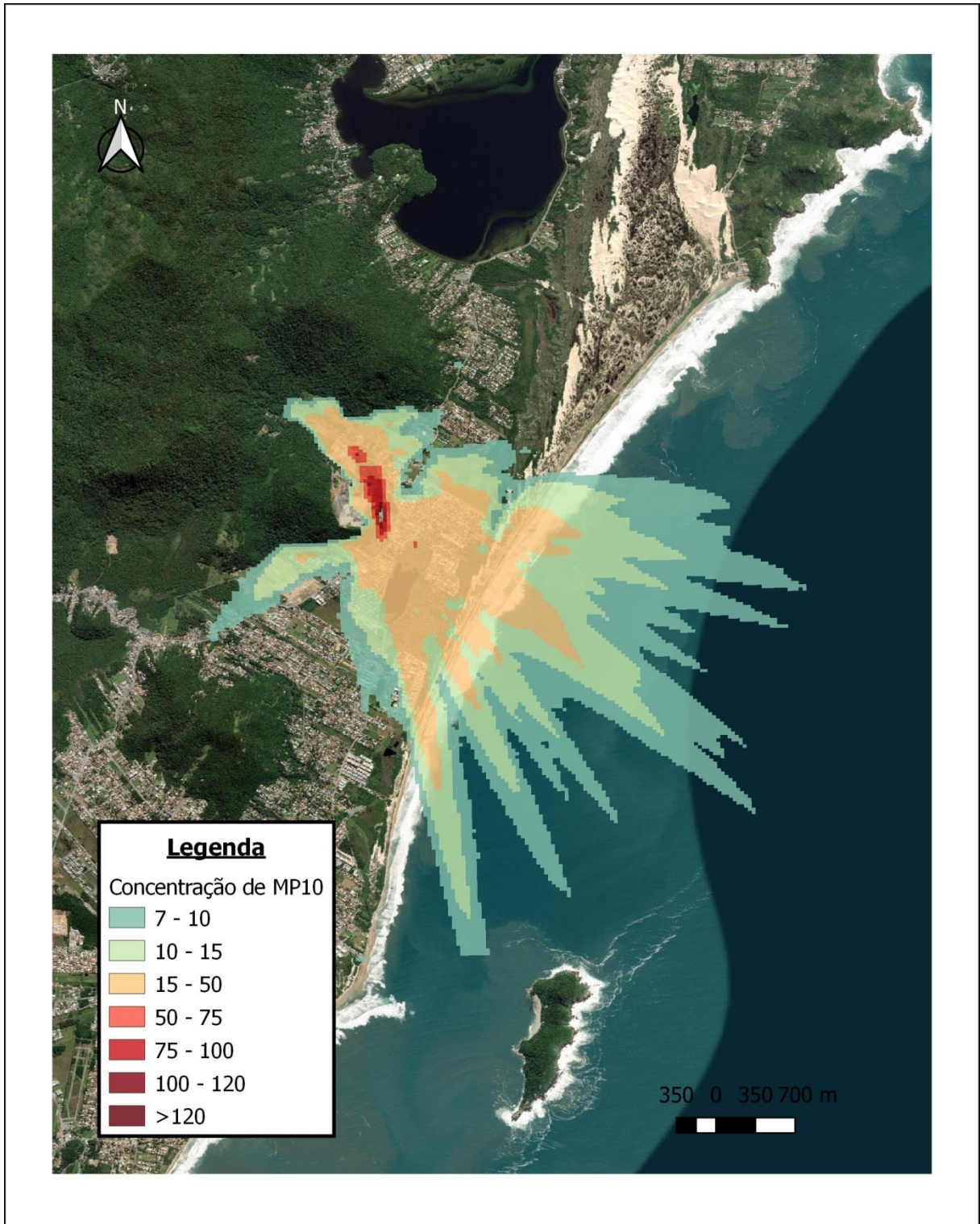


Figura 24 - Pluma de dispersão de MP₁₀ emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.

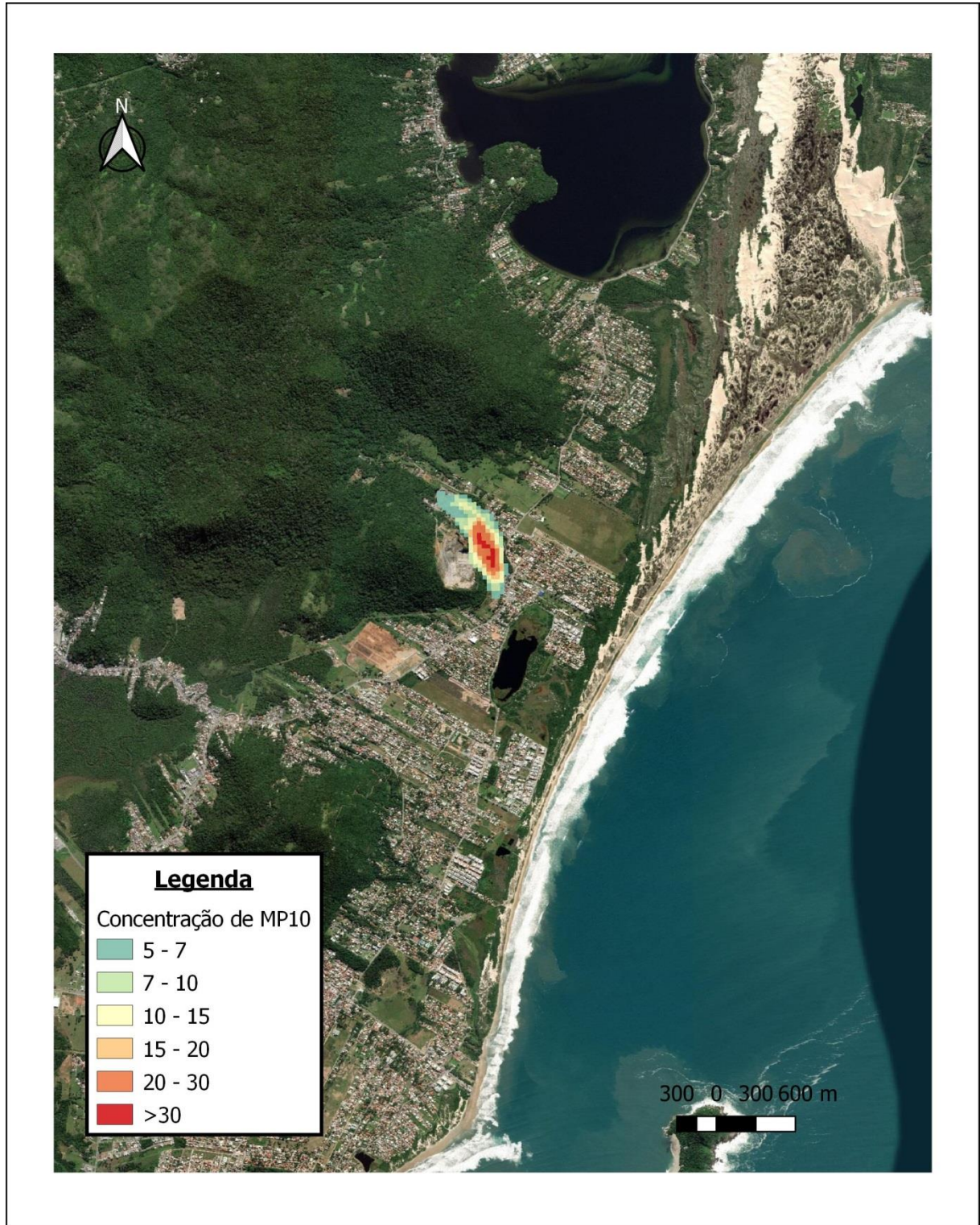


Figura 25 - Pluma de dispersão de PTS emitida por ambas as fontes, em um período de 24 horas.

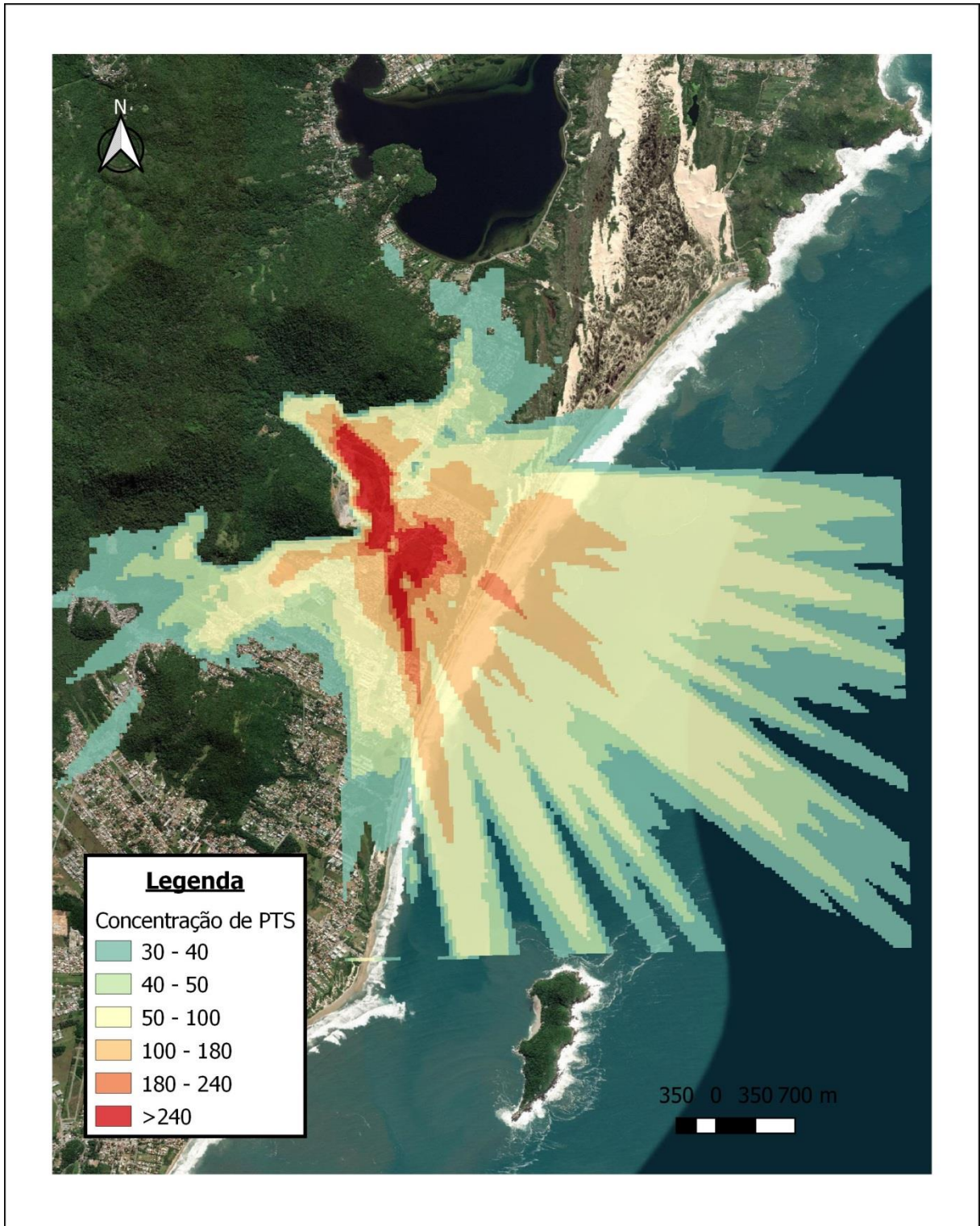
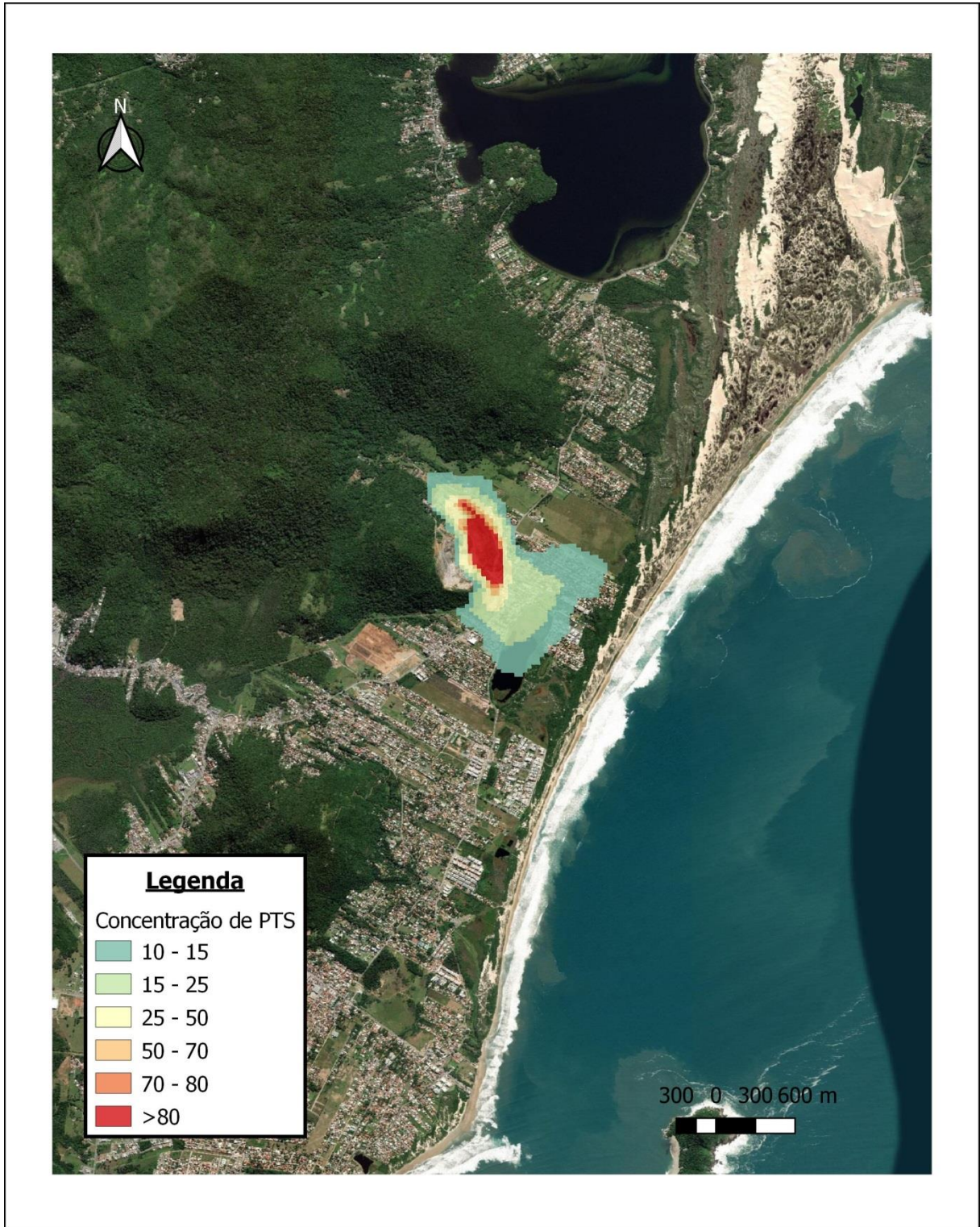


Figura 26 - Pluma de dispersão de PTS emitida por ambas as fontes, em um período de 1 ano.



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos na modelagem de dispersão das vias não pavimentadas indicaram violações aos padrões de qualidade do ar, principalmente no cenário das concentrações máximas, onde as concentrações de MP₁₀ e PTS atingiram 223,24 e 1729,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Em contrapartida, o poluente MP_{2,5} não apresentou nenhuma violação a qualidade do ar, cuja concentração máxima encontrada foi de 22,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, equivalente a 92% do padrão final da legislação.

Os resultados da dispersão de poluentes provenientes de depósitos de material a céu aberto não apresentaram nenhuma violação aos padrões de qualidade do ar, visto que as maiores concentrações obtidas no período de 24 horas para MP_{2,5}, MP₁₀ e PTS foram 4,02, 28,36 e 51,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

O resultado da modelagem das emissões totais, de ambas as fontes, mostrou que o poluente MP_{2,5} não apresentou nenhuma violação aos parâmetros de qualidade do ar, já que sua maior concentração foi de 14,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, representando 59% do padrão final da legislação. Já, o poluente MP₁₀ apresentou duas violações em relação ao PI-1, cuja maior concentração foi de 146,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A modelagem do poluente PTS resultou em 4226 violações a legislação, com uma concentração máxima de 1245,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Vale destacar que os resultados supracitados são apenas considerados para a fonte isolada (pedreira), e não para a totalidade das fontes emissoras.

Desta forma, conclui-se que as vias não pavimentadas são a principal fonte de emissão analisada da pedreira.

Vale salientar que para este trabalho não foram consideradas todas as fontes de emissão provenientes de uma pedreira, como detonações, emissões fugitivas, britadores, etc. Optou-se apenas por avaliar fontes que causam maior impacto a qualidade do ar.

As plumas de dispersão mostram que as concentrações mais elevadas se mantêm próximas a fonte de emissão, e à medida que elas se distanciam os valores se reduzem consideravelmente.

Também, a dispersão de poluentes tende a seguir a direção predominante do vento, no entanto a pluma não ultrapassa relevos de altitudes maiores, fenômeno que pode ser visto claramente nas imagens das plumas de dispersão.

Há maneiras de reduzir as emissões de poluentes, fazendo com que as concentrações se mantenham abaixo do permitido pela legislação, e conseqüentemente reduzindo os

impactos gerados. Para as vias não pavimentadas sugere-se o investimento em pavimentação, assim reduziria as emissões de poeira à atmosfera. Outra solução seria a umidificação, tanto dos acessos como das pilhas de material, através da aspersão com o uso de água, este método aumentaria o teor de umidade dos materiais e reduziria assim as emissões.

Desta forma, recomenda-se para um próximo estudo avaliar, através da modelagem, a concentração dos poluentes emitidos com as propostas de soluções supracitadas, a fim de confirmá-las cientificamente.

Recomenda-se também utilizar dados de entrada medidos em campo, de forma a aumentar a precisão dos resultados encontrados. Além de realizar o monitoramento da qualidade do ar da região, assim seria possível validar os resultados da modelagem.

REFERÊNCIAS

ABRIL, Gabriela A. et al. Particulate matter concentrations originating from industrial and urban sources: Validation of atmospheric dispersion modeling results. **Atmospheric Pollution Research**. Córdoba, p. 180-189. 31 ago. 2015.

BARBON, Amarildo; GOMES, Júlio. **Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com uso do modelo AERMOD**. 15. ed. Rio de Janeiro: N, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522010000200005&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 11 out. 2019.

BRASIL. Ceptec - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Inpe - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Dados históricos**. 2019. Disponível em: <<http://bancodedados.ceptec.inpe.br/>>. Acesso em: 12 out. 2019.

CARAMEZ, Alexandre Beiro. **Contribuição para gestão e controle das emissões atmosféricas geradas por pedreiras e usinas de asfalto (CBUQ)**. 2004. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHAULYA, S. K.; CHAKRABORTY, M. K.; SINGH, R. S.. **Air Pollution Modelling for a Proposed Limestone Quarry**. Water, Air, And Soil Pollution. India, p. 171-191. fev. 2001.

CIMORELLI, Alan et al. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. **Journal Of Applied Meteorology**. Philadelphia, p. 682-693. jan. 2004. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAM2227.1>>. Acesso em: 12 set. 2019.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. . **Air Quality Criteria for Particulate Matter**. Estados Unidos, 2004. 900 p.

EPA UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **AERMOD: Description of Model Formulation**. EPA-454/R-3-004, 91 p., 2004.

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

HOINASKI, Leonardo. **Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP10)**. 2010. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MARQUES, Leonardo da Cunha. **Modelagem Atmosférica da Dispersão de Poluentes Atmosféricos em Indústria Siderúrgica no Ceará**. 2017. 2017 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/29090/3/2017_dis_lcmarques.pdf>. Acesso em: 05 out. 2019.

MOREIRA, Gregori de Arruda. **Método para Obtenção da Altura da Camada Limite Planetária a Partir de Dados de Lidar**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Autarquia Associada A Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Gregori%20de%20Arruda%20Moreira_M.pdf>. Acesso em: 19 set. 2019.

Organização Pan Americana da Saúde. **Níveis de poluição do ar estão crescendo em muitas das cidades mais pobres do mundo**. 2016. Disponível em: <https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5096:niveis-de-poluicao-do-ar-estao-crescendo-em-muitas-das-cidades-mais-pobres-do-mundo&Itemid=839>. Acesso em: 19 out. 2019

Resolução Conama nº 003, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.. . Brasil, 22 ago. 1990. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 02 set. 2019.

Resolução Conama nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.. . Brasil, Disponível em:

<<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>. Acesso em: 02 nov. 2019.

Rudolf de Noronha. **Evolução da Regulamentação de Emissões Atmosféricas de Poluentes no Brasil**. Brasil, 2010. Color.

RUIZ, M. S. **O Conflito entre urbanização e mineração de argilas no município de campinas estudo de caso**:. Dissertação (Mestrado) da Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 1989. 148p

SÃO PAULO. CETESB. . **Poluentes**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 10 set. 2008.

SÃO PAULO. CETESB. . **Poluição do ar: gerenciamento e controle de fontes**. 2. ed. São Paulo: C, 2017. 254 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2017/11/Apostila-Polui%C3%A7%C3%A3o-do-Ar-Gerenciamento-e-Controlde-Fontes.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2019.

SILVA LORA, E. E. – **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Editado pela ANEEL, 503 pg., 2000.

SILVA, Solange Teles da. **A proteção da qualidade do ar**. 1997. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/1696/a-protecao-da-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 30 set. 2019.

UNITED STATES. NACIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. . **Radiosonde Database**. 2000. Disponível em: <<https://ruc.noaa.gov/raobs/>>. Acesso em: 14 out. 2019.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models**. 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>>. Acesso em: 20 set. 2019.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Stationary Point and Area Sources**. 2. ed. Estados Unidos: Epa, 1995. 26 p. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/toc_kwrtd.pdf>. Acesso em: 08 set. 2019.