

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLARA GABRIELI PERES MARQUES

EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO E ÓXIDOS DE
NITROGÊNIO: UM ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS LICENCIADAS
INSTALADAS EM GUARAPUAVA-PR

CURITIBA

2020

CLARA GABRIELI PERES MARQUES

EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO E ÓXIDOS DE
NITROGÊNIO: UM ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS LICENCIADAS
INSTALADAS EM GUARAPUAVA-PR

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Departamento de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, Alemanha, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Arislete Dantas de Aquino

Coorientador: Prof. MSc. Mauricy Kawano

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M357e Marques, Clara Gabrieli Peres

Emissões atmosféricas de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio [recurso eletrônico]: um estudo de caso em indústrias licenciadas instaladas em Guarapuava-PR. / Clara Gabrieli Peres Marques. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná (SENAI - PR), Universität Stuttgart.

Orientadora: Arislete Dantas de Aquino.
Coorientador: Mauricy Kawano.

1. Monóxido de carbono. 2. Combustão. 3. Ar - Poluição. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aquino, Arislete Dantas de. III. Kawano, Mauricy. IV. Título.

CDD: 363.7392

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CLARA GABRIELI PERES MARQUES** intitulada:

EMISSIONES ATMOSFÉRICAS DE MONÓXIDO DE CARBONO E ÓXIDOS DE NITROGÊNIO: UM ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS LICENCIADAS INSTALADAS EM GUARAPUAVA-PR, sob orientação da Profa. Dra. ARISLETE DANTAS DE AQUINO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Novembro de 2020.


ARISLETE DANTAS DE AQUINO

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


ARION ZANDONÁ FILHO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


VALMA MARTINS BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Não construímos nada sozinhos, não estamos sozinhos, e por acreditar nisto, com grande orgulho devo dizer que esta conquista não é só minha. Não haveria participação em mestrado e uma dissertação elaborada se não fosse pela preciosa contribuição de cada um de vocês. Por isso designo o meu muito obrigada...

A Deus, a Força Maior que rege todas as coisas, que me permitiu o dom da vida e a oportunidade da realização deste trabalho. Obrigada por me guiar e pelo seu amor.

Aos meus amados pais Amilcar e Maria Isabel, e irmãos Moisés e José Gabriel. Obrigada por sempre me apoiarem nos meus desafios, me amarem, respeitarem, entenderem minhas limitações, compreenderem minhas ausências em diversos momentos e desejarem sempre o melhor para mim. Vocês são meu exemplo e meu porto seguro.

Obrigada à minha família, vocês me permitiram a vida e me ensinam a ser boa, justa e a lutar pelos meus sonhos e ideais.

Ao meu querido Enzo Luigi, que é muito mais que um maravilhoso companheiro. Meu amigo, confidente e meu orientador extraoficial. Obrigada por me apoiar, por ser tão compreensivo e além de tudo compartilhar seus conhecimentos. Afinal você me ajudou na elaboração e revisão deste e tantos outros trabalhos e projetos. Não haveria análises e mapas sem a sua contribuição, a qual não poupou nem mesmo finais de semana e feriados. Obrigada pelo seu amor, carinho e por me fazer feliz.

Àqueles que contribuíram com este processo de mestrado, me acolhendo em Curitiba e São José dos Pinhais, e sendo companhia nas várias idas e vindas à Curitiba. Foram tantas participações, hospedagens e prosas, que tornaram tudo mais leve e grandioso.

Aos meus amigos e sogros, que compreenderam a minha ausência, meus vários “não, tenho que mexer na dissertação” e sempre estiveram ao meu lado torcendo por mim.

Aos meus colegas de trabalho que foram compreensivos quando precisei faltar e até mesmo assumiram meu papel quando foi necessário.

A todos os professores do PPGMAUI que me proporcionaram o aprendizado. Em especial agradeço aos meus orientadores pela dedicação, confiança, apoio, paciência e atenção voltados ao desenvolvimento e finalização da dissertação.

Aos membros da banca examinadora que gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação.

Agradeço a equipe da SEMAG e do Conselho do Plano Diretor de Guarapuava que me disponibilizaram dados e atenção que possibilitaram a realização deste trabalho.

Meu sincero agradecimento a todos que contribuíram direta ou indiretamente. Vocês foram fundamentais para o fechamento deste ciclo. Obrigada!

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

Marcel Proust

RESUMO

A poluição atmosférica nos dias atuais é um grande desafio e trata-se de um grave problema ambiental. Levantamentos sobre emissões atmosféricas que sejam atualizados e disponibilizados frequentemente são escassos, o que compromete a sua aplicabilidade como instrumento de avaliação, gestão e licenciamento ambiental. O objetivo deste trabalho é apresentar um inventário de emissões atmosféricas de material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x) de indústrias licenciadas instaladas em Guarapuava-PR e a elaboração de mapas de níveis de poluição atmosférica, para apresentá-los como ferramenta de gestão ambiental. Dados de fontes de emissão foram obtidos por meio de licenças ambientais dos empreendimentos. As cargas dos poluentes foram estimadas por meio dos fatores de emissão do AP-42. A distribuição espacial das fontes de emissão e respectivos níveis de poluição estimados, foi efetuada em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para a geração dos mapas de calor foi adotada a densidade de *Kernel*. O método geoestatístico de *Kriging* permitiu a interpolação entre dados de poluição e localização. Uma Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada para avaliar a distribuição dos valores das cargas de MP, CO e NO_x. Foram obtidas informações de 174 fontes emissoras de poluentes atmosféricos, distribuídas entre fontes fugitivas (39%) e pontuais (61%). As estimativas de emissões ocorreram para 46 fontes pontuais, as quais dispunham de informações apropriadas em suas licenças ambientais, resultando em cargas totais de CO de 298,36 kg/h, para NO_x 989,93 kg/h e para MP 243,07 kg/h. As maiores cargas de MP e NO_x estiveram associadas às usinas de asfalto que empregam óleo de xisto na combustão e de CO à indústria de papel e celulose que utiliza a madeira. Apesar da predominância no uso de materiais derivados de madeira na combustão industrial, a discrepância evidenciada para as emissões de MP e NO_x, vinculadas ao uso do óleo de xisto, indicou o elevado potencial poluidor deste combustível. A maior concentração das fontes pontuais ocorreu na região urbana, contudo, as áreas mais críticas de nível de MP, CO e NO_x previstas, encontram-se em sua maioria, fora do perímetro urbano. Ainda assim foram evidenciados receptores de maior sensibilidade (centros educacionais, unidades de saúde, áreas verdes e praças) que estão situados sob influência relevante de fontes de emissão na área urbana. A análise dos resultados ressalta a importância de se considerar a variável espacial quando se trata de poluição atmosférica, para evitar que se desprezem aspectos relevantes. Ficou evidente que o elevado potencial poluidor de um empreendimento pode superar o grau de impacto de um aglomerado de fontes. O produto obtido neste estudo é proposto como ferramenta para avaliar a condição locacional de novos empreendimentos e contribuir para decisões coerentes sobre novos processos de licenciamento e gestão ambiental local. Este material tem potencial para auxiliar em investigações de conformidade, decisões em licenciamentos ambientais e no estabelecimento de critérios de permissão de operação industrial.

Palavras-chave: Inventário de emissões atmosféricas. AP-42. Fator de emissão.

Material particulado. Monóxido de carbono. Óxidos de nitrogênio. Combustão.

ABSTRACT

Air pollution today is a major challenge and a serious environmental problem. Surveys on atmospheric emissions that are frequently updated and made available are scarce, compromising their applicability as an instrument for environmental assessment, management, and licensing. The objective of this work is to present an inventory of atmospheric emissions of particulate matter (PM), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxides (NO_x) from licensed industries installed in Guarapuava-PR and the preparation of maps of atmospheric pollution levels to present them as an environmental management tool. Data on emission sources were obtained through environmental project licenses. Pollutant loads were estimated using the AP-42 emission factors. Were used a Geographic Information System (GIS) for the spatial distribution of the emission sources and respective levels of pollution estimated. Kernel density was adopted for the generation of heatmaps. Kriging's geostatistical method allowed the interpolation between pollution and location data. A Principal Component Analysis (PCA) was used to assess PM, CO, and NO_x loads' distribution values. Information was obtained from 174 sources of air pollutants, distributed among fugitive (39%) and punctual sources (61%). Emissions estimates were made for 46 punctual sources, which had appropriate information in their environmental licenses, resulting in 298.36 kg/h for CO, 989.93 kg/h for NO_x, and 243.07 kg/h for PM. The highest charge of PM and NO_x were associated with asphalt plants that use shale oil for combustion and CO to the paper and cellulose industry that uses wood. Despite the predominance of using wood-derived materials in industrial combustion, the discrepancy evidenced for PM and NO_x emissions, linked to the use of shale oil, indicated the high polluting potential of this fuel. The highest concentration of punctual sources occurred in the urban region. However, the most critical PM, CO, and NO_x levels foreseen are mostly located outside the urban perimeter. Even so, receptors of greater sensitivity (educational centers, health units, green areas, and squares) were found to be located under relevant influence from emission sources in the urban area. The results' analysis highlights the importance of considering the spatial variable for atmospheric pollution to avoid neglecting relevant aspects. It was evident that the high polluting potential of an enterprise can overcome the degree of impact of a cluster of sources. The product obtained in this study is proposed as a tool to assess the locational condition of new projects and contribute to coherent decisions about new licensing and local environmental management processes. This material has the potential to assist in compliance investigations, environmental licensing decisions, and the establishment of industrial operation permission criteria.

Keywords: Inventory of atmospheric emissions. AP-42. Emission factor. Particulate material. Carbon monoxide. Nitrogen oxides. Combustion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - ETAPAS DESENVOLVIDAS NO PRESENTE TRABALHO..... | 44 |
| FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA/PR..... | 45 |
| FIGURA 3 - TIPOS DE FONTES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS..... | 54 |
| FIGURA 4 - HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS EMPREENDIMENTOS AMOSTRADOS EM FUNÇÃO DAS LICENÇAS AMBIENTAIS... | 59 |
| FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE MP, CO E NOX EM FUNÇÃO DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO NAS INDÚSTRIAS..... | 63 |
| FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE MP, CO E NOX EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE INDÚSTRIAS POR ATIVIDADE EXERCIDA..... | 67 |
| FIGURA 7 - MAPA DA SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DE FONTES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA PONTUAIS E FUGITIVAS LICENCIADAS EM GUARAPUAVA-PR..... | 70 |
| FIGURA 8 - MAPA DE FONTES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA E ZONEAMENTO DO PERÍMETRO URBANO DO DISTRITO SEDE DE GUARAPUAVA-PR..... | 72 |
| FIGURA 9 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO, ÁREAS VERDES E PRAÇAS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 75 |
| FIGURA 10 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO E CENTROS EDUCACIONAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 77 |
| FIGURA 11 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO E UNIDADES DE SAÚDE NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 79 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 12 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE MATERIAL PARTICULADO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 82 |
| FIGURA 13 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE MONÓXIDO DE CARBONO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 84 |
| FIGURA 14 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA..... | 86 |
| FIGURA 15 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) PARA CARGA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS (MP, CO E NOX) POR FONTES PONTUAIS..... | 89 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 1 - PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL O GLP, NO PARANÁ..... | 33 |
| QUADRO 2 - PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL O ÓLEO COMBUSTÍVEL, NO PARANÁ..... | 34 |
| QUADRO 3 - PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO DERIVADOS DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL, NO PARANÁ..... | 35 |
| QUADRO 4 - CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS COMBUSTÍVEIS..... | 48 |
| QUADRO 5 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA A COMBUSTÃO EMPREGANDO O COMBUSTÍVEL GLP E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO..... | 49 |
| QUADRO 6 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL A MADEIRA E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO..... | 50 |
| QUADRO 7 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA A COMBUSTÃO EMPREGANDO O ÓLEO COMBUSTÍVEL E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO..... | 51 |
| QUADRO 8 - DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE EMISSÃO PONTUAIS E FUGITIVAS ENTRE AS ATIVIDADES LICENCIADAS DESENVOLVIDAS EM GUARAPUAVA..... | 56 |
| QUADRO 9 - CARGAS DE EMISSÃO DE POLUENTES POR TIPO DE COMBUSTÍVEL UTILIZADO NAS INDÚSTRIAS..... | 64 |
| QUADRO 10 - CARGAS DE EMISSÃO DE POLUENTE DISTRIBUÍDAS ENTRE A QUANTIDADE DE INDÚSTRIAS QUE DESEMPENHAM DIFERENTES ATIVIDADES..... | 67 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------|--|
| AA | Autorização Ambiental |
| ACP | Análise de Componentes Principais |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| AP-42 | <i>Compilation of Air Pollutant Emissions Factors</i> |
| BPF | Baixo Ponto de Fluidez |
| CEMA | Conselho Estadual do Meio Ambiente |
| CNAE | Classificação Nacional de Atividades Econômicas |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONCIDADE | Conselho do Plano Diretor de Guarapuava |
| COV | Compostos Orgânicos Voláteis |
| DEA | Declaração de Emissões Atmosféricas |
| DLAE | Dispensa de Licença Ambiental |
| EEA | <i>European Environment Agency</i> |
| FIEP | Federação das Indústrias do Estado do Paraná |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| HPAs | Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos |
| IAP | Instituto Ambiental do Paraná (atualmente incorporado pelo IAT pela lei estadual nº 20.070/2019) |
| IAT | Instituto Água e Terra |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| LAS | Licença Ambiental Simplificada |
| LASR | Licença Ambiental Simplificada de Regularização |
| LI | Licença de Instalação |
| LO | Licença de Operação |
| LOR | Licença de Operação de Regularização |
| LP | Licença Prévia |
| MP | Material Particulado |
| MP ₁₀ | Material particulado com diâmetro igual ou inferior a 10 µm |
| N.D. | Não Disponível |
| OC | Óleos Combustíveis |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |

| | |
|---------|--|
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PRONAR | Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar |
| RLAS | Renovação da Licença Ambiental Simplificada |
| RLO | Renovação de Licença de Operação |
| SEMA | Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos |
| SEMAG | Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Guarapuava |
| SGA | Sistema de Gestão Ambiental |
| SIG | Sistemas de Informações Geográficas |
| TIN | <i>Triangulated Irregular Network</i> |
| U.S.EPA | <i>United States Environmental Protection Agency</i> |
| UCs | Unidades de Conservação |
| ZCE | Zonas Central Estendida |
| ZD | Zona de Densificação |
| ZE | Zonas Especiais |
| ZEC | Zona de Expansão Controlada |
| ZI | Zonas Industriais |
| ZPB | Zona de Proteção de Bacia |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 OBJETIVOS | 17 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 2.1 ATIVIDADE INDUSTRIAL E AS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS | 18 |
| 2.1.1 Atividade industrial..... | 18 |
| 2.1.2 Atividade industrial em Guarapuava | 19 |
| 2.2. COMBUSTÍVEIS | 19 |
| 2.2.1. Biomassa: Derivados de madeira | 20 |
| 2.2.2. Gás Liquefeito de Petróleo | 21 |
| 2.2.3 Óleo combustível | 22 |
| 2.3 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA..... | 23 |
| 2.3.1 Poluentes atmosféricos | 23 |
| 2.3.2 Material particulado | 25 |
| 2.3.3 Monóxido de carbono | 26 |
| 2.3.4 Óxidos de nitrogênio..... | 27 |
| 2.3.5 Impactos associados às emissões atmosféricas | 28 |
| 2.4 INSTRUMENTOS DE GESTÃO AMBIENTAL | 30 |
| 2.4.1 Licenciamento ambiental | 30 |
| 2.4.2 Padrões de emissão de poluentes atmosféricos | 32 |
| 2.4.3 Automonitoramento de emissões atmosféricas | 36 |
| 2.4.4 Inventário de emissões atmosféricas..... | 37 |
| 2.4.5 Estudos e inventários de emissões atmosféricas | 38 |
| 2.4.6 Fatores de emissão atmosférica..... | 41 |
| 2.4.7 Sistemas de Informação Geográfica - SIG | 43 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 44 |
| 3.1 LOCAL DE ESTUDO..... | 45 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2 | DADOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL | 46 |
| 3.3 | OBTENÇÃO DE DADOS E PREENCHIMENTO DE LACUNAS | 47 |
| 3.4 | DADOS DO ZONEAMENTO MUNICIPAL | 48 |
| 3.5 | ENQUADRAMENTO DAS FONTES PONTUAIS DE EMISSÃO | 49 |
| 3.6 | APLICAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO AP-42..... | 49 |
| 3.5 | ANÁLISE DE DADOS | 52 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 54 |
| 4.1 | QUANTIFICAÇÃO DAS FONTES E ATIVIDADES INDUSTRIAIS..... | 54 |
| 4.2 | MATERIAIS COMBUSTÍVEIS..... | 58 |
| 4.3 | LICENCIAMENTO E MONITORAMENTO AMBIENTAL..... | 58 |
| 4.4 | CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS | 61 |
| 4.5 | ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS..... | 63 |
| 4.6 | DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS | 69 |
| 4.7 | EMISSÕES E O ZONEAMENTO URBANO..... | 71 |
| 4.8 | EMISSÕES E RECEPTORES SENSÍVEIS..... | 74 |
| 4.9 | ANÁLISE DOS NÍVEIS DE POLUIÇÃO | 81 |
| 4.10 | FERRAMENTA PARA A GESTÃO AMBIENTAL | 91 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 96 |
| | REFERÊNCIAS..... | 98 |
| | ANEXO I..... | 113 |

1. INTRODUÇÃO

O acelerado desenvolvimento industrial está atrelado ao uso de recursos naturais para a obtenção de matéria-prima e à geração de efluentes, sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos. A poluição atmosférica é reflexo, dentre outros fatores, da combustão de combustíveis em processos industriais que demandam energia térmica, o que é motivo de cada vez maior preocupação ambiental.

Os poluentes atmosféricos provenientes de processos de combustão variam em função do combustível utilizado, de suas características, da tecnologia empregada e das condições operacionais. Os efluentes gasosos de processos de combustão frequentemente encontrados são óxidos de nitrogênio (NO_x), Material Particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV).

Ainda que medidas referentes a redução das cargas poluidoras não aconteçam de forma proativa, a legislação ambiental recai sobre estes sistemas produtivos. Tratam-se de medidas de controle e monitoramento, em prol da qualidade dos recursos naturais e daqueles que os utilizam.

A legislação e o licenciamento ambiental são aliados no sentido de obrigar o empreendedor a monitorar suas emissões e, a partir disto, procurar reduzi-las. Ao licenciamento ambiental é conferida a responsabilidade de determinar ou aprovar a localização e as condições operacionais de um empreendimento com vistas a minimizar os impactos associados.

O município de Guarapuava, situado no estado do Paraná, desde 2015 é responsável pelo licenciamento de empreendimentos e atividades de pequeno e médio porte locais, o que por um lado traz maior celeridade aos processos, mas também maior responsabilidade para o órgão municipal de controle ambiental. A condição de descentralização do licenciamento de empreendimentos de impacto local, prevista pela Lei Complementar nº 140/2011 da Presidência da República, deve se expandir e abranger um número cada vez maior de municípios. Estes estarão sujeitos a definir e implementar instrumentos e sistemas para melhor gerir esta responsabilidade. Desta forma todo e qualquer instrumento que auxilie na tomada de decisões com relação ao licenciamento ambiental torna-se importante.

Um inventário de emissões atmosféricas pode auxiliar no gerenciamento da qualidade do ar e no desenvolvimento de estratégias de controle. Isto pode ocorrer por meio do fornecimento de informações sobre os níveis de poluição de determinada região, o local ou a categoria da fonte. O levantamento das emissões pode ser feito de forma qualitativa ou quantitativa, a depender do resultado esperado.

Em se tratando do panorama atual das emissões atmosféricas industriais, já são diversas as formas de controle, redução e monitoramento disponíveis. No entanto têm-se ainda como gargalo a indisponibilidade de levantamentos abrangentes e que sejam constantemente atualizados. Esta condição inviabiliza o seu uso como ferramenta de gestão e licenciamento ambiental. O uso de fatores de emissão acaba por suprir lacunas de dados em termos de cargas de emissões. Estes dados, associados a um mapeamento de regiões delimitadas, podem servir para o estabelecimento de critérios voltados à tomada de decisões de maneira sustentada.

O relatório de inventário de emissões atmosféricas do estado do Paraná, abrangendo o município de Guarapuava, analisou dados de monitoramentos efetuados há nove anos (GRAUER, 2013), e desde então não houve atualização divulgada. A instalação de novas fontes e a alteração das características das emissões atmosféricas é algo extremamente dinâmico e variável, que deveria ter um acompanhamento constante para viabilizar a sua aplicabilidade.

São diversos os municípios brasileiros que não dispõem de inventário de emissões atmosféricas ou qualquer outro instrumento equivalente, que apresente potencial para auxiliar o órgão público de controle ambiental. Auxílio este em termos de questionar a viabilidade de novos empreendimentos, cujos efluentes atmosféricos possam contribuir para a degradação das condições de qualidade do ar local.

A metodologia empregada neste trabalho pode ser perfeitamente extrapolada para qualquer região ou local de interesse. Este estudo apresenta um instrumento de gestão de poluentes atmosféricos industriais para o município de Guarapuava. O levantamento qualiquantitativo de 174 fontes de emissão pontuais e fugitivas, realizado com o emprego de fatores de emissão do AP-42, (*Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*), bem como a espacialização das

fontes e níveis de emissão em mapas podem contribuir para a tomada de decisões quando se trata do licenciamento ambiental de indústrias locais.

Os dados sobre as unidades industriais utilizados foram obtidos a partir de processos de licenciamento em fase de avaliação ou concluídos, e os fatores de emissão são originados do AP-42, um instrumento consolidado e bastante empregado desde a sua apresentação em 1968. A forma de utilização dos fatores seguiu as orientações do próprio AP-42. Estas condições remetem à validade da metodologia adotada.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de realizar um inventário de emissões atmosféricas de indústrias licenciadas instaladas no município de Guarapuava - PR por meio de fatores de emissão do AP-42, bem como efetuar sua interpretação por intermédio de Análise de Componentes Principais, espacialização, interpolação pelo método geoestatístico de *Kriging* e mapas de calor por densidade de *Kernel*. Por fim, apresentar o inventário como ferramenta de gestão para o licenciamento ambiental municipal apontando áreas de maior susceptibilidade à impactos associados a poluição atmosférica.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estimar as emissões de material particulado total, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio a partir da atividade industrial licenciada em Guarapuava - PR, por meio dos fatores de emissão propostos pelo AP-42;
- Definir a espacialização dos pontos mais críticos pela elevada emissão de poluentes no município;
- Avaliar a potencial influência das fontes de poluição sobre áreas e unidades sensíveis do zoneamento urbano considerando as divisões de uso e ocupação do solo e unidades como escolas, centros de saúde, Unidades de Conservação (UCs) e áreas de lazer, as quais apresentam maior concentração de pessoas com maior vulnerabilidade em contrair doenças e a serem afetadas;
- Propor o uso do estudo e mapeamento efetuado como ferramenta para a tomada de decisão em novos processos de licenciamento ambiental local.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ATIVIDADE INDUSTRIAL E AS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A industrialização associada à urbanização e à extração de recursos naturais é responsável pela emissão de taxas significativas de poluentes atmosféricos (ANDRADE et al., 2017; MARTINS et al., 2017).

A queima de combustível fornece energia térmica para diferentes processos. Em função da geração de gases pela queima do combustível há necessidade de pontos de escape associados aos equipamentos de combustão, ou seja, um acessório de descarga, como uma chaminé ou duto, de forma a melhorar a dispersão dos mesmos (SEMA, 2014; VERGNHANINI FILHO, 2018).

2.1.1 Atividade industrial

A pesquisa industrial anual - empresa, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) busca identificar as características estruturais básicas do segmento empresarial na atividade industrial brasileira, e reporta que em 10 anos, entre 2007 e 2017 houve um acréscimo de cerca de 13,6% da atividade industrial de transformação (IBGE, 2017a).

A produção industrial do Paraná cresceu 5,4% entre janeiro e novembro de 2019, tendo sido o maior índice do país neste período. O Paraná é destaque em função de sua produção agrícola e também dispõe de importante parque industrial com representação nos seguintes setores: Alimentos, vestuário e acessórios, madeira, construção civil, veículos e carrocerias (IBGE, 2020).

A representatividade de empregos formais do Paraná chega a 6,4% do total nacional, e desse volume cerca de 27,8% estão vinculados à indústria, o que coloca o estado na posição de quarto maior parque industrial nacional. A região centro-sul, é marcada pela geração de empregos industriais através dos setores de madeira, construção civil e alimentos e, por sua vez, está em quinta posição quando se trata do Produto Interno Bruto (PIB) estadual, representando 4,5% (FIEP, 2016).

2.1.2 Atividade industrial em Guarapuava

O município de Guarapuava situado no estado do Paraná apresentava, segundo dados do IBGE (2017b) um PIB de cerca de R\$ 5,6 bilhões, em 2017, o que o colocava em 11^a posição no *ranking* estadual do PIB a preços correntes e na 15^a posição na categoria do PIB da atividade industrial no estado. O PIB municipal cresceu cerca de 120% entre 2010 e 2017 (IBGE, 2017b).

Guarapuava dispõe de um total de 433 indústrias, agrupadas em três categorias, sendo elas extração de minerais, transformação e serviços industriais de utilidade pública (MTE, 2018). A indústria de transformação é predominante, representando 96% do total, e nesta classe são destaques as indústrias dos seguintes setores: madeira e mobiliário, produtos alimentícios, de bebida e álcool etílico, metalúrgica e mecânica, em ordem decrescente de representatividade (IPARDES, 2020). Conforme a prefeitura do município recebem destaque ainda os setores de papel e produção de pintainhos, que estão em desenvolvimento, e a planta da maior maltaria cervejeira da América Latina ali instalada (GUARAPUAVA, 2019).

Em 2017 estavam cadastrados no Sistema Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP), 127 indústrias instaladas no município de Guarapuava, sendo a subclasse predominante a fabricação de produtos de madeira (22%), seguida da atividade de subclasse fabricação de produtos alimentícios (10,2%), conforme Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), versão 2.0 (IBGE, 2020). A fabricação de celulose, papel e produtos de papel aparece em terceira posição, juntamente com a fabricação de produtos de minerais não-metálicos, com representatividade de 6,3% cada um deles (FIEP, 2017).

2.2. COMBUSTÍVEIS

Para o emprego de energia em processos de geração de calor pode ser adotado a combustão de diversos combustíveis, sejam estes sólidos, líquidos ou gasosos.

Segundo o balanço energético nacional a matriz energética brasileira, com ano base 2017, é formada predominantemente por fontes não renováveis,

contemplando urânio - energia nuclear, gás natural, carvão mineral, petróleo e derivados. Entretanto, o consumo de lenha e carvão vegetal, energia hidráulica, derivados de cana-de-açúcar e outras fontes renováveis está ascendendo, totalizando 42,9%, quase metade da matriz energética. A maior demanda do setor industrial no país é pelas fontes bagaço de cana-de-açúcar (20,2%), eletricidade (20%), gás natural (11,3%), carvão mineral (13,2%) e lenha (8,6%) (EPE, 2018).

Dentre os diversos tipos de combustíveis existentes cabe ressaltar os derivados de madeira, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e óleos combustíveis, os quais são abordados a seguir, justamente por sua utilização ser destaque no município de interesse.

2.2.1. Biomassa: Derivados de madeira

O custo dos combustíveis, aspectos relacionados à poluição atmosférica, disponibilidade de materiais e substituição de combustíveis fósseis, repercutem há algum tempo, na procura por fontes alternativas de produção de energia, como a biomassa. O termo biomassa é utilizado como referência a produtos de origem vegetal ou animal. Os materiais envolvem resíduos e excedentes agrícolas, agroindustriais, florestais e orgânicos, incluindo aqueles oriundos de sistemas de tratamento de esgoto. (CHEREMISINOFF, CHEREMISINOFF, ELLERBUSCH, 1980; HEIN, BEMTGEN, 1998; PANWAR, PRASAD, WASEWAR, 2011; SAUD et al., 2013).

O uso da biomassa tem se viabilizado em função dos seguintes aspectos: custo relativamente baixo quando comparado ao óleo combustível e gás natural; disponibilidade; menor emissão dos poluentes SO_x , NO_x , em função da composição do combustível; e menor emissão de dióxido de carbono (CO_2), desde que a intensidade de colheita do material seja condizente com a taxa de crescimento do mesmo. A biomassa apresenta potenciais benefícios de redução de poluentes, na combustão associada, com substituição parcial de combustíveis fósseis (SAIDUR et al., 2011; REN et al., 2017). Estes combustíveis são amplamente utilizados no estado do Paraná.

Aspectos desfavoráveis da biomassa estão atrelados à dificuldade em sua coleta, manuseio e armazenamento, ao seu baixo valor de aquecimento,

presença de umidade no material, que provoca flutuações na produção energética pela evaporação da água, e portanto, custos adicionais relacionados ao pré-tratamento para secagem (SAIDUR et al., 2011; DE FUSCO, JEANMART, BLONDEAU, 2015).

Na resolução SEMA nº 016/2014 são considerados derivados de madeira os materiais em forma de lenha, cavacos, carvão vegetal, serragem, pó de lixamento, casca, aglomerado, compensados e assemelhados, que não tenham sido tratados com produtos halogenados, revestidos com produtos polimerizados, tintas ou outros revestimentos (SEMA, 2014).

2.2.2. Gás Liquefeito de Petróleo

O GLP originado do processo de refino do petróleo ou fracionamento do gás natural, consiste de uma mistura de hidrocarbonetos, principalmente propano, propeno, butano e buteno, com proporção variável (PERRY, CHILTON, 1980; ANP, 2004; METEKU, ANKUDEY, OCRAN, 2019). Tem por característica ser gasoso nas condições normais de temperatura e pressão e ser liquefeito devido a compressão ou resfriamento. Desta forma é transportado e armazenado no estado líquido e quando liberado para utilização é vaporizado, o que facilita e viabiliza o seu transporte e manuseio (SEGUEL, MANCILLA, SAKAMOTO, 2018; PETROBRÁS, 2019a).

A presença de hidrocarbonetos mais pesados, como o n-pentano, dificulta a vaporização do gás e sua combustão, o que pode levar à formação de fuligem. Devido a isto a presença destes compostos no GLP é restrita (PETROBRÁS, 2019a). O GPL é caracterizado por apresentar condições de combustão limpa e elevado poder calorífico (WANG et al., 2016).

Comparado a outros combustíveis o GLP é considerado limpo, com reduzidas emissões de MP, SO_x e NO_x. A baixa emissão de compostos sulfurados é função da disponibilidade de enxofre no combustível ser baixa, justamente devido à submissão do GLP, produzido nas refinarias de petróleo, ao processo de dessulfurização. Além disto, pela facilidade de mistura com o oxigênio, ambos no estado gasoso, a combustão é otimizada. Sua aplicação ocorre em ambientes domésticos, comerciais e industriais (AMORIN et al., 2018; COELHO et al., 2018; PETROBRÁS, 2019a; IANNIELLO et al., 2020).

2.2.3 Óleo combustível

A qualidade e comercialização de óleos combustíveis, derivados de petróleo no Brasil, é regulamentada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da resolução ANP nº 3/2016.

O material é originado do resíduo da destilação e refino do petróleo, ao qual é adicionado um diluente, que pode contribuir com o percentual de enxofre na composição (PETROBRÁS, 2019b). A classificação destes combustíveis ocorre em função da viscosidade a 60°C, e do teor de enxofre, conforme apresentado a seguir:

- OCA1: óleos de maior teor de enxofre (<2% massa) e menor limite de viscosidade (<620 mm²/s);
- OCA2: óleos de maior teor de enxofre (<2% massa) e maior limite de viscosidade (<960 mm²/s);
- OCB1: óleos de menor teor de enxofre (<1% massa) e menor limite viscosidade (<620 mm²/s);
- OCB2: óleos de menor teor de enxofre (<1% massa) e maior limite viscosidade (<960 mm²/s);
- OC3: óleos com viscosidade ou teor de enxofre (<3% massa) superior aos limites especificados nas classes anteriores (ANP, 2016).

A classificação com relação ao teor de enxofre é efetuada como A para alto teor de enxofre e B para baixo teor de enxofre. Com relação ao ponto de fluidez os óleos são diferenciados entre Baixo Ponto de Fluidez (BPF) e Alto Ponto de Fluidez, cujos valores variam conforme a região e o período do ano (ANP, 2016; PETROBRÁS, 2019b).

Os óleos combustíveis obtidos a partir do xisto apresentam alta fluidez, portanto, não requerem o preaquecimento para seu manuseio (PETROBRAS, 2020). Este óleo é hidrogenado e refinado para se tornar usual e tem por característica apresentar teor elevado de nitrogênio e enxofre, na forma de compostos orgânicos (PERRY, CHILTON, 1980; TONG et al, 2013; JIE, BO, 2016; CHANG et al., 2018). Os compostos contendo nitrogênio podem reduzir a

estabilidade do combustível e, levar à emissão de NO_x durante a combustão (ALMARRI, MA, SONG, 2009; ZHANG et al, 2013). Assim lançam-se alguns estudos voltados à viabilização da remoção destes heteroátomos do óleo de xisto (YU, LI, JIN, 2010; JIE, BO, 2016; PRADO, RAO, KLERK, 2017; LUO et al., 2018; GAO et al., 2020).

Os óleos destilados são aqueles mais voláteis e menos viscosos que os óleos residuais. Os óleos residuais tendem a apresentar quantidades significativas de cinza, nitrogênio e enxofre. Além disto os óleos residuais, em função de sua baixa fluidez requerem um pré-aquecimento para o seu manuseio e utilização (PERRY, CHILTON, 1980; ASTM, 2019).

2.3 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A capacidade de autodepuração do meio ambiente nem sempre é suficiente para assimilar os poluentes na variabilidade e quantidade com que têm sido emitidos. As emissões atmosféricas sempre existiram, no entanto, com a atividade industrial e o desenvolvimento dos grandes centros urbanos estas são intensificadas.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que a contribuição da poluição do ar ambiente com a mortalidade mundial chegou a 7,6% em 2016. No Brasil 613 mortes a cada 100.000 habitantes, foram atribuídas à poluição do ar em 2016 (WHO, 2018a).

A poluição do ar mata cerca de 7 milhões de pessoas a cada ano, sendo a maioria das mortes em países de baixa e média renda. Isto coloca a poluição do ar no patamar de maior risco para a saúde voltado às questões ambientais. A poluição do ar ambiente está correlacionada a morbidade e mortalidade por doenças cardíacas, vasculares, respiratórias, pulmonares e câncer de pulmão. Os poluentes considerados mais preocupantes incluem partículas, o ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de enxofre (SO_2) (WHO, 2018b).

2.3.1 Poluentes atmosféricos

Os poluentes atmosféricos são materiais nos estados sólido, líquido ou gasoso, que uma vez presentes na atmosfera podem repercutir em impactos

sobre a saúde e o meio ambiente. A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 491/2018, como forma de regulamentar e padronizar o termo poluente atmosférico, apresenta a seguinte definição para o mesmo:

Qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade (CONAMA, Art. 2º, p.1, 2018).

Como produto da combustão restam as escórias, o material particulado (MP) e espécies gasosas, sendo as mais comuns o dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), metano (CH₄) e Compostos Orgânicos Voláteis (COV). Os gases gerados e as suas concentrações variam em função das características do combustível e impurezas presentes, da temperatura de combustão, pressão na câmara de combustão, temperatura para iniciar e manter a combustão, da relação da mistura combustível/ar e do tempo de residência do combustível na câmara de combustão (WERTHER et al., 2000; RUSSEL, 2013).

Após o lançamento de poluentes na atmosfera a sua dispersão não é controlável, já que os mesmos se misturam ao ar e são levados por correntes de vento, constituindo-se em um fenômeno complexo. Após lançados na atmosfera os poluentes se dispersam, com sentido e velocidade, relacionados às características da fonte emissora, topografia do terreno, condições meteorológicas e atmosféricas (INDUMATI et al., 2009; BARBON, GOMES, 2010; LEI et al., 2016; GUPTA, GUPTA, 2016; CERQUEIRA, ALBUQUERQUE, SOUSA, 2018; WANG et al., 2019) e inclusive às condições de barreira vegetal em ambiente urbano (TALEGHANI et al., 2019; XING, BRIMBLECOMBE, 2019).

Quando a fonte de emissão dispõe de dispositivo de direcionamento do fluxo gasoso é dito que se trata de uma fonte pontual. Uma fonte é considerada fixa, ou estacionária, se for uma instalação, equipamento ou processo que permaneça em local fixo, emitindo matéria ou energia para a atmosfera (CONAMA, 2011; SEMA, 2014). A emissão é denominada fugitiva se o sistema não é completamente vedado, levando a vazamentos e dispersão de gases e particulados. Conforme a resolução CONAMA nº 436/2011 a emissão fugitiva é

dada pelo lançamento de matéria na atmosfera de maneira difusa, sem direcionamento e controle de seu fluxo (CONAMA, 2011).

O material particulado, monóxido de carbono e os óxidos de nitrogênio recebem destaque neste trabalho. Informações a respeito destes poluentes atmosféricos são detalhadas a seguir, como forma de destacar sua importância e elucidar alguns impactos associados.

2.3.2 Material particulado

O material particulado total é popularmente denominado como poeira, fuligem, fumaça ou névoa. As partículas são levadas pelo vento, principalmente as menores, e uma vez no ar, são depositadas em superfícies pela ação da precipitação, chuva ou neve, ou sob a influência da gravidade (KUZMICHEV, LOBOYKO, 2016; KUZMICHEV, AZAROV, STEFANENKO, 2018).

Em termos da poluição do ar a resolução SEMA nº 016/2014 apresenta o material particulado como material sólido ou líquido, em mistura gasosa, que se mantém neste estado na temperatura do meio filtrante, utilizado em eventos de amostragem e monitoramento (SEMA, 2014).

As partículas apresentam variação de granulometria, sendo distinguidas entre Partículas Totais em Suspensão (PTS), ou seja, material particulado em suspensão na atmosfera cujo tamanho varia de 10 a 100 μm ; partículas inaláveis com 10 μm ou menos de diâmetro (PM_{10}); e partículas finas, com 2,5 μm ou menos de diâmetro ($\text{PM}_{2,5}$). Partículas $\text{PM}_{2,5}$ compõem a porção de poeira que pode ser aspirada profundamente nos pulmões, enquanto as partículas PM_{10} nas vias aéreas superiores. Partículas maiores tendem a ficar presas no nariz, boca ou garganta (U.S.EPA, 1995; AL-THANI, KOÇ, ISAIFAN, 2018; AUSTRALIAN DEPARTMENT OF AGRICULTURE, WATER AND THE ENVIRONMENT, 2019).

A composição das partículas varia em função da fonte que a originou (PUTAUD et al., 2010). Como possíveis fontes de emissão podem ser apresentadas a atividade industrial, pelo manuseio de materiais a granel, combustão e processamento de minerais; os incêndios naturais ou não; tempestade de poeira; dispersão de pólen; produtos em pó; meios de transporte pela queima de combustíveis, desgaste de pneu e a própria movimentação veicular (JIANG et al., 2017; AUSTRALIAN DEPARTMENT OF AGRICULTURE,

WATER AND THE ENVIRONMENT, 2019). O MP é liberado diretamente das fontes ou pode ser formado como poluente secundário a partir das emissões primárias (JIANG et al., 2017; AL-THANI, KOÇ, ISAIFAN, 2018).

O AP-42 (*Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*), apresenta uma compilação de fatores de emissão de poluentes do ar realizada pela United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA). De acordo com este documento o material particulado total é dividido em dois grupos: particulado filtrável e particulado condensável. A porção filtrável refere-se ao material que em um evento de amostragem é coletado em filtro do trem de amostragem de partículas, a cerca de 120°C. A porção condensável consiste de material que se encontra na forma de vapor na temperatura do filtro durante a coleta (U.S.EPA, 1995).

Os processos que envolvem a combustão de biomassa são frequentemente mencionados como as principais fontes de emissão de poeira, fuligem e partículas de aerossol em geral, para a atmosfera (SIMONEIT, 2002; GARBARAS et al., 2015; ZHAO et al., 2015). Para Qiu et al. (2014) a emissão de MP é função do teor de cinzas do combustível utilizado, da proporção de escória inferior e cinzas volantes, bem como da eficiência da coleta de poeira do sistema de controle adotado.

2.3.3 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um poluente antropogênico primário, ou seja, é gerado diretamente em uma fonte de emissão e lançado à atmosfera. É o produto da combustão incompleta de combustíveis carbonáceos (LIU et al., 2018; KINOSHITA et al., 2020), em geral quando a quantidade de ar suprida é inferior à quantidade teórica, ou estequiométrica. Em todo o processo de combustão o produto final é dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água, no entanto se o oxigênio disponível for inferior à quantidade estequiométrica necessária para a combustão completa tem-se a formação de CO (BRANCO, MURGEL, 2004; GUO et al., 2018).

Rushingabigwi et al. (2020) apontaram que o CO pode ser lançado na atmosfera juntamente à fumaça, um aerossol gasoso proveniente de processos

de combustão incompletos. Além disto ressaltam que a presença de aerossol e monóxido de carbono no ar, está associada a graves danos à saúde.

O CO é um gás incolor, inodoro e insípido (LIU et al., 2018). É o mais abundante poluente atmosférico e um dos mais perigosos tóxicos respiratórios, sendo considerado um assassino silencioso, desde que sua toxicidade foi apontada por Claude Bernard (1857). Ele atua interferindo no transporte de oxigênio aos tecidos, pois compete com o O₂ e combina-se com a hemoglobina, com a qual tem maior afinidade quando comparado ao oxigênio (SANDILANDS, BATEMAN, 2016).

2.3.4 Óxidos de nitrogênio

O grupo dos compostos de NO_x contempla o monóxido de nitrogênio ou óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂), em menor escala, e óxido nitroso (N₂O), em casos particulares de combustão em leito fluidizado. Os óxidos de nitrogênio (NO_x) formam-se a partir do nitrogênio disponível no ar de combustão ou no combustível utilizado, em geral em altas temperaturas. No primeiro caso o nitrogênio atmosférico é oxidado, e no segundo caso ocorre a quebra de ligações do nitrogênio presente no combustível e posterior reação com oxigênio. O NO₂ forma-se a partir do NO onde há excesso de ar (SEINFELD, 1986; VERGNHANINI FILHO, 2016; GIODA, 2018). Como descrito no AP-42 e na resolução SEMA nº 016/2014, os NO_x referem-se ao composto de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) (U.S.EPA, 2010; SEMA, 2014).

Segundo Kim et al. (2020) as técnicas para o controle de emissão de NO_x podem ocorrer diretamente no processo, ou como medidas de fim de tubo, nos próprios gases de combustão. As medidas ligadas ao processo, geralmente com menor custo associado, contemplam a redução dos teores de oxigênio ou nitrogênio nas regiões da câmara de combustão de alta temperatura, redução do tempo de residência destes nessas regiões, e a redução das temperaturas na câmara de combustão (VERGNHANINI FILHO, 2016).

2.3.5 Impactos associados às emissões atmosféricas

A poluição do ar repercute em efeitos tóxicos sobre os seres vivos, odores desagradáveis, efeitos sobre materiais, vegetação, propriedades da atmosfera e também, conseqüentemente efeitos econômicos e sociais (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2014). Os efeitos dependem da concentração do poluente na atmosfera, da toxicidade do poluente, do tempo de exposição e da sensibilidade do indivíduo exposto (WHO, 2016; ANDRADE et al., 2017).

Em estudo realizado por Gavinier e Nascimento (2014) foram investigados efeitos da poluição atmosférica na saúde da população de Sorocaba. Como resultado foi indicado que ainda que os níveis dos poluentes estejam abaixo dos valores máximos permitidos por legislação, por vezes estes são capazes de provocar efeitos nocivos. Os autores observaram a associação direta entre o poluente NO₂ e hospitalizações por acidente vascular encefálico no local.

A inalação de material particulado pelo homem é indicada como a causa e o agravamento para o câncer de pulmão e doenças crônicas dos pulmões e do coração (BAY et al., 2015; RAFAEL et al., 2015).

Wu et al. (2017) afirmam que o consumo de combustível é um dos principais contribuintes para a poluição do ar. Estes autores observaram que partículas finas provenientes da combustão de óleo diesel e gasolina estão associadas a doenças como citotoxicidade e genotoxicidade, representando potencial risco grave à saúde.

Bravo et al. (2015) ao estudarem os impactos dos poluentes, material particulado com diâmetro aerodinâmico de até 10 µm, NO₂, SO₂ e CO confirmaram a associação existente entre o aumento do risco de mortalidade não acidental, cardiovascular e respiratória. Relatam também números elevados de mortes atribuídas à poluição do ar.

Patra, Gautam e Kumar (2016) observaram alguns impactos adversos à saúde da comunidade relacionado a poluição por MP, como vias aéreas restritas, aumento de doenças cardiovasculares, pneumoconiose, câncer, efeitos neurotóxicos, capacidade e função pulmonar reduzida.

Taleghani et al. (2019) apontaram que o NO₂ juntamente com o material particulado são as principais causas de mortalidade relacionada a poluição no Reino Unido.

Em estudo efetuado por Dapper et al. (2016) a respeito de doenças vinculadas com a poluição atmosférica no estado de São Paulo foi verificado que os danos não ocorrem apenas a nível de sistema respiratório e circulatório, mas podem provocar riscos como baixo peso ao nascer, incidência e mortalidade por câncer, partos prematuros e anemia falciforme.

Liu et al. (2018) encontraram associações significativas entre exposições a curto prazo ao CO do ambiente e o aumento de internações hospitalares nas 26 maiores cidades da China. O CO é a principal causa de mortes por envenenamento no Japão, chegando a registrar de 2.000 a 5.000 mortes por ano (KINOSHITA et al., 2020).

Com relação aos impactos sobre o meio ambiente, Seinfeld e Pandis (1998) e Vergnhanini Filho (2016), relataram que o *smog* fotoquímico, com efeito local, é resultante da reação fotoquímica entre NO_x e COV, o que provoca a formação de gases agressivos, como o ozônio, o mais abundante dentre eles. A reação é ativada por radiação solar, já que a incidência de raios ultravioletas tem potencial de fotólise do NO_2 , liberando oxigênio atômico no estado excitado e deixando-o disponível para reagir com o oxigênio molecular e formar ozônio (O_3) (MORAES, 2017).

Para Hassler et al. (2016) e Seinfeld (1986) o ozônio troposférico é originado pela reação de oxidação fotoquímica entre CO e COV na presença de NO_x . Os óxidos de nitrogênio também podem ser precursores da formação de chuvas ácidas e ter influência no ataque à camada de ozônio (VERGNHANINI FILHO, 2016).

Yang et al. (2018) apontaram que os principais setores industriais responsáveis pela poluição atmosférica na China são metalurgia, produtos não-metálicos e a indústria química. O estudo buscou avaliar as contribuições por parte das indústrias relacionadas ao longo do ciclo de vida dos produtos vinculados a estes setores. Os autores indicaram que para mitigar eficientemente as emissões, é necessário quantificar as emissões a montante e avaliar as forças motrizes a jusante e, portanto, não direcionar ações de mitigação de emissões apenas em fim de tubo.

2.4 INSTRUMENTOS DE GESTÃO AMBIENTAL

Os instrumentos de gestão ambiental apresentam-se como medidas para minimizar ou controlar as emissões e, por conseguinte, os impactos associados a estas. Neste sentido, a fim de regulamentar a poluição atmosférica, surgiram resoluções, procedimentos administrativos, normas e leis referentes. Dentre estes destacam-se o licenciamento ambiental, padrões de emissão, automonitoramento e os inventários de emissões.

2.4.1 Licenciamento ambiental

A resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997 define o licenciamento ambiental como:

Procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso (CONAMA, 1997).

Por sua vez a resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CEMA) nº 70/ 2009 que trata sobre o licenciamento de atividades industriais no estado do Paraná, evidencia a necessidade de apresentação de relatório de automonitoramento de emissões atmosféricas (CEMA, 2009). Para complementar a lei do estado do Paraná nº 13.806/ 2002 dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, em seu art. 30, condiciona a necessidade de licenciamento ambiental para empreendimentos e atividades potencialmente poluidoras do ar (PARANÁ, 2002).

Em março de 2015, a prefeitura de Guarapuava tornou-se responsável pela emissão de licenciamento de empreendimentos e atividades de pequeno e médio porte locais, as quais até então eram responsabilidade do órgão estadual, a saber, o Instituto Água e Terra (IAT). Trata-se da descentralização para a emissão de licenciamentos de empreendimentos de impacto local, prevista pela

lei complementar nº 140/2011 e a resolução CEMA nº 088/2013. Esta condição confere maior agilidade para os processos, autonomia e reforça atividades de fiscalização e monitoramento ambiental (IAT, 2015).

A resolução SEMA nº 016/2014 em seu art. 11 impõe a necessidade de que toda atividade no Paraná, seja esta industrial, comercial ou de serviços, que disponha de fonte emissora de poluentes atmosféricos, efetue periodicamente a caracterização e a quantificação destas emissões por meio de amostragem em duto ou chaminé. Isto deve ocorrer independentemente do tipo de combustível utilizado e se aplica inclusive para atividades com Dispensa de Licenciamento Ambiental Estadual (DLAE) e Licenciamento Ambiental Simplificado (LAS). Para tanto, esta resolução estabelece valores máximos permitidos de concentração para as emissões de poluentes atmosféricos de diversas fontes industriais, comerciais e de serviços, os denominados padrões de emissão (SEMA, 2014).

Tendo em vista a importância das emissões atmosféricas de um empreendimento e dos impactos associados a estes, no momento da requisição de licença ambiental o próprio Sistema de Gestão Ambiental (SGA) dispõe de item específico para a entrada de informações referentes e o cadastro dos equipamentos de combustão instalados no empreendimento.

O processo de licenciamento ambiental requer a otimização para a atuação do órgão ambiental e atendimento aos empreendedores, de forma a manter um instrumento eficaz para a proteção ambiental sem inviabilizar o desenvolvimento econômico e social. Neste sentido, atualmente o IAT trabalha com a quase totalidade de processos de licenciamento ambiental dentro do ambiente virtual denominado Sistema de Gestão Ambiental (SGA), disponível em seu site. A Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Guarapuava (SEMAG), com a descentralização do licenciamento para a autarquia municipal, passou a trabalhar de maneira integrada no mesmo SGA utilizado pelo IAT.

Em dezembro de 2019 o Instituto Água e Terra anunciou uma novidade sobre a Declaração de Emissões Atmosféricas (DEA). Trata-se da autodeclaração pelo empreendedor sobre atividades correlatas ao automonitoramento das emissões. Esta medida promete proporcionar maior agilidade à análise dos processos de licenciamento ambiental, já que se trata de condicionante para empreendimentos que utilizam sistema de emissão, conforme legislações PARANÁ (2002), CEMA (2009) e SEMA (2016). Além disto

o sistema promete gerar automaticamente inventários de emissões atmosféricas (IAT, 2019), o que de fato poderá ser viabilizado já que os dados de monitoramentos já estarão vinculados ao sistema.

2.4.2 Padrões de emissão de poluentes atmosféricos

As resoluções nacionais CONAMA nº 382/2006 e nº 436/2011 estabelecem limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. A distinção entre as resoluções é feita com base no ano de instalação ou do pedido de Licença de Instalação (LI) do empreendimento. Desta maneira a resolução CONAMA nº 436/2011 é aplicável para fontes fixas instaladas ou com solicitação de LI anterior a 2 de janeiro de 2007 (fontes existentes). A resolução CONAMA nº 382/2006, a qual foi complementada pela resolução CONAMA nº 436/2011 é, portanto, aplicável às demais fontes (fontes novas) (CONAMA, 2006; CONAMA, 2011).

A resolução SEMA nº 016/2014 em vigência no Paraná, possui caráter mais restritivo para os padrões de emissão. Os critérios considerados para estabelecimento dos padrões são: atividade, tipologia do poluente, data de instalação ou pedido de licença de instalação do empreendimento, material combustível utilizado, potência térmica ou capacidade nominal de operação das fontes de emissão, se a combustão é externa ou não, assim como acontece nas resoluções CONAMA supracitadas, e a concentração de poluentes na área de influência das fontes de poluição atmosférica potencial (SEMA, 2014).

A referida legislação impõe padrões de emissão para fontes estacionárias de processos de geração de calor ou energia de maneira generalista, que utilizem diferentes combustíveis. A resolução ainda discorre sobre padrões aplicáveis a determinadas atividades específicas, por exemplo: tratamento de superfície, pintura, galvanoplastia e decapagem; fundição de metais; incineração; coprocessamento; fornos crematórios; produção de asfalto; produção de cimento; fabricação de vidros; indústria de cal, calcário e derivados; craqueamento catalítico; conversor de amônia; fabricação de placas à base de madeira; indústria de papel e celulose; indústria de fertilizantes, entre outros (SEMA, 2014).

A seguir são apresentados os padrões de emissão atmosférica estabelecidos pela resolução SEMA nº 016/2014 e a frequência de automonitoramento aplicável, com base nos seguintes combustíveis: GLP, óleo combustível e derivados de madeira.

Com o uso de GLP o monitoramento dos poluentes MP e SO_x não é aplicável. No caso das fontes existentes de combustão externa e fontes novas ou existentes de combustão não externa, com até 10 MW de potência térmica nominal, para a combustão de GLP, o órgão ambiental licenciador pode aceitar o atendimento apenas do parâmetro CO ou de NO_x. A condição referencial aplicável de oxigênio para fontes de combustão externa, quando não é utilizado pré-aquecedor regenerativo de ar de combustão é de 3%, e para a combustão não externa de 17%. Os respectivos padrões são listados no QUADRO 1.

QUADRO 1- PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL O GLP, NO PARANÁ

| Potência térmica nominal (MW) | CO (mg/Nm ³) | NO _x (mg/Nm ³) | Frequência |
|---|--------------------------|---------------------------------------|------------|
| Fonte nova: Combustão externa | | | |
| Até 70 | 80 | 320 | Semestral |
| Entre 70 e 100 | 80 | 200 | Semestral |
| Acima de 100 | 80 | 200 | Contínuo |
| Fonte existente: Combustão externa | | | |
| Até 50 | 80 | 500 | Semestral |
| Entre 50 e 100 | 80 | 320 | Semestral |
| Acima de 100 | 80 | 200 | Contínuo |
| Fonte nova ou existente: Combustão não externa | | | |
| Até 70 | 500 | 320 | Semestral |
| Entre 70 e 100 | 500 | 200 | Semestral |
| Acima de 100 | 500 | 200 | Contínuo |

FONTE: Adaptado de SEMA (2014).

Os óleos combustíveis enquadram-se na divisão “combustível líquido mineral, vegetal ou animal e assemelhados” disponível na resolução SEMA nº

016/2014. No caso de equipamentos com até 10 MW é possível que o órgão ambiental licenciador aceite apenas o atendimento das emissões de CO, em concentração máxima de 80 mg/Nm³.

Para este combustível, por sua vez diferente dos derivados de madeira e GLP, a resolução exige o monitoramento dos óxidos de enxofre (SO_x), porém este poluente não foi objeto de estudo.

A condição referencial aplicável de oxigênio para fontes de combustão externa é de 3% e demais casos de 17%. Os respectivos padrões são expostos no QUADRO 2.

QUADRO 2 - PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL O ÓLEO COMBUSTÍVEL, NO PARANÁ

| Potência térmica nominal (MW) | MP total (mg/Nm ³) | CO (mg/Nm ³) | NO _x (mg/Nm ³) | | Frequência |
|---|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------|------------|
| | | | Até 1%N | Acima de 1%N | |
| Fonte nova ou existente: Combustão externa | | | | | |
| Até 10 | 300 | 500 | 1.600 | 1.600 | Semestral |
| Entre 10 e 50 | 250 | 250 | 820 | (328+492*N) | Semestral |
| Entre 50 e 100 | 100 | 250 | 620 | (248+372*N) | Semestral |
| Acima de 100 | 75 | 175 | 620 | (248+372*N) | Contínuo |
| Fonte nova ou existente: Combustão não externa | | | | | |
| Até 10 | N.A. | 500 | N.A. | N.A. | Semestral |
| Entre 10 e 50 | 250 | 500 | 820 | (328+492*N) | Semestral |
| Entre 50 e 100 | 100 | 500 | 620 | (248+372*N) | Semestral |
| Acima de 100 | 75 | 500 | 620 | (248+372*N) | Contínuo |

FONTE: Adaptado de SEMA (2014).

LEGENDA: %N – gravimétrico de nitrogênio; N.A. - Não aplicável.

Para processos estacionários de geração de calor ou energia que utilizem como combustível derivados de madeira, a resolução SEMA nº 016/2014 delibera que caso a potência térmica nominal da fonte seja menor que 10 MW existe a possibilidade de ser feito apenas o monitoramento de CO ao invés de fazer MP simultaneamente, mediante aprovação do programa de automonitoramento de emissões atmosféricas do empreendimento.

Para avaliação e comparação do parâmetro CO, o equipamento de combustão deverá estar operando em plena carga, ou seja, condição que utilize pelo menos 90% da sua capacidade nominal ou licenciada (SEMA, 2014). Os limites de emissão impostos são apresentados no QUADRO 3.

QUADRO 3 - PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR FONTE DE COMBUSTÃO UTILIZANDO DERIVADOS DE MADEIRA COMO COMBUSTÍVEL, NO PARANÁ

| Potência térmica nominal (MW) | MP total (mg/Nm ³) | CO (mg/Nm ³) | NO _x (mg/Nm ³) | Frequência |
|---|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------|
| Fonte nova: Combustão externa | | | | |
| Até 0,05 | 560 | 5.000 | N.A. | Anual |
| Entre 0,05 e 0,15 | 560 | 2.500 | N.A. | Anual |
| Entre 0,15 e 1 | 560 | 1.300 | N.A. | Anual |
| Entre 1 e 10 | 560 | 1.000 | N.A. | Semestral |
| Entre 10 e 30 | 400 | 1.000 | 500 | Semestral |
| Entre 30 e 70 | 200 | 1.000 | 500 | Semestral |
| Entre 70 e 100 | 100 | 1.000 | 500 | Semestral |
| Acima de 100 | 100 | 500 | 500 | Contínuo |
| Fonte existente: Combustão externa | | | | |
| Até 0,5 | 560 | 6.000 | N.A. | Anual |
| Entre 0,5 e 2 | 560 | 3.000 | N.A. | Anual |
| Entre 2 e 10 | 560 | 2.500 | N.A. | Anual |
| Entre 10 e 50 | 400 | 2.000 | 500 | Semestral |
| Entre 50 e 100 | 200 | 1.000 | 500 | Semestral |
| Acima de 100 | 100 | 500 | 500 | Contínuo |
| Fonte nova ou existente: Combustão não externa | | | | |
| Até 0,5 | 560 | 6.000 | N.A. | Anual |
| Entre 0,5 e 2 | 560 | 3.000 | N.A. | Anual |
| Entre 2 e 10 | 560 | 3.000 | N.A. | Semestral |
| Entre 10 e 50 | 400 | 3.000 | 500 | Semestral |
| Entre 50 e 100 | 200 | 3.000 | 500 | Semestral |
| Acima de 100 | 100 | 2.000 | 500 | Contínuo |

FONTE: Adaptado de SEMA (2014).
 LEGENDA: N.A. - Não aplicável.

A condição referencial de oxigênio em excesso para fontes de combustão externa é de 11% e para a combustão não externa de 17%, o que corresponderia a condição ótima operacional teórica.

Dentre os equipamentos utilizados comumente para a combustão destacam-se as caldeiras e os fornos. O primeiro caso é classificado como fonte fixa de combustão externa, ou seja, onde os produtos de combustão não entram em contato direto com o material ou produto processado. No caso dos fornos estes são enquadrados como fonte fixa de combustão não externa, cujo processo é caracterizado pelos produtos de combustão entrarem em contato direto com o material ou produto processado.

Atividades específicas como a produção de asfalto e os fornos crematórios tem padrões diferenciados. Na produção de asfalto as emissões de MP não devem ultrapassar 90 mg/Nm³ para a condição referencial de O₂ de 17%, com monitoramento semestral. Os limites para fornos crematórios são de 125 mg CO/Nm³ (monitoramento contínuo) e 100 mg MP/Nm³ (monitoramento semestral), ambos corrigidos para O₂ referencial de 7%.

O monitoramento dos parâmetros anteriormente mencionados deve acontecer acompanhado da avaliação de oxigênio (O₂) em excesso emitido pelo processo de combustão. Isto se justifica pela necessidade de correção para o oxigênio referencial de diluição e posterior comparação à legislação.

2.4.3 Automonitoramento de emissões atmosféricas

A gestão atmosférica no estado do Paraná tem como alicerce o monitoramento da qualidade do ar, pelo uso de estações de monitoramento de poluentes próximas aos receptores, e o controle das próprias fontes de poluentes atmosféricos, como as indústrias.

A lei estadual nº 13.806/2002, em seu artigo 38, estabeleceu que os empreendimentos e atividades que disponham de fontes efetivas ou potencialmente poluidoras do ar, devem tomar medidas com vistas à um melhor desempenho ambiental e vinculado a isto, adotar o automonitoramento ambiental (PARANÁ, 2002).

A partir dos resultados obtidos com o monitoramento devem ser tomadas medidas no sentido de melhorar continuamente o desempenho ambiental

associado. Inclusive, conforme a resolução SEMA nº 016/2014, os relatórios de automonitoramento de emissões são exigidos para o licenciamento ambiental estadual. Quando o licenciamento ocorrer em outra autarquia ainda assim deverá ocorrer a apresentação dos mesmos ao IAT (SEMA, 2014).

2.4.4 Inventário de emissões atmosféricas

O emprego do termo inventário de emissões atmosféricas ocorre quando se tem por pretensão a caracterização das emissões. Um inventário é uma listagem de poluentes das fontes de emissão em uma área geográfica durante um período de tempo. Sua amplitude pode ser nacional, estadual, regional ou local. Com isto é possível identificar as principais fontes locais e atuar eficientemente no gerenciamento da qualidade do ar, além de investigar questões de saúde pública e perdas econômicas relacionadas (BANG, KHUE, 2019).

A resolução do CONAMA nº 5/1989 aponta o inventário de fontes poluidoras do ar como um instrumento do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), com relação às cargas e locais de emissão de poluentes. Neste sentido apresenta a estratégia de elaboração de um inventário nacional de fontes e emissões, o qual deve permitir o cadastramento e a estimativa das emissões (CONAMA, 1989).

Os inventários são instrumentos notáveis para a avaliação e gestão da qualidade do ar e, portanto, na deliberação sobre estratégias e políticas de controle de emissões. Eles permitem o reconhecimento de atividades e locais que apresentam as emissões de poluentes mais críticas para a atmosfera e o mecanismo de formação da poluição, quando se relaciona quantidade, classe, sistemas de controle e localização das emissões em uma área durante um período de tempo (QIU et al., 2014; SANTOS et al., 2016). Os inventários são relevantes em estudos envolvendo modelo de dispersão de poluentes atmosféricos (BARBON, GOMES, 2010).

A *European Environment Agency* (EEA) (2019) reforça a importância da transparência em um inventário em termos das fontes de dados, premissas e metodologias utilizadas. Isto viabiliza a comunicação, troca de informações, replicação e avaliação do inventário pelas partes interessadas. As principais

finalidades para os inventários são: fornecer informações aos formuladores de políticas e regulamentações; estabelecimento de prioridades ambientais; identificação de atividades nocivas; avaliação de riscos e impactos ambientais; monitoramento ambiental; e acompanhamento do cumprimento de metas ambientais, normas e padrões estabelecidos.

2.4.5 Estudos e inventários de emissões atmosféricas

Özden et al. (2008) realizaram estudo de avaliação da qualidade do ar da cidade de Eskişehir, na Turquia, com relação aos poluentes SO₂, MP, NO₂, O₃ e carbonos orgânicos voláteis não metânicos. Para a avaliação da qualidade do ar prevalente em Eskişehir efetuou-se o monitoramento local e foram considerados inventários de emissões locais e estudos de monitoramento no âmbito nacional, para SO₂ e MP, e âmbito local para NO₂ e O₃. Eles concluíram que o tráfego e os sistemas de aquecimento residencial são os principais responsáveis pela poluição do ar na cidade. Além disto, que as condições climáticas e topográficas de um local interferem na taxa de emissão de poluentes.

O estudo de Sindhwani et al. (2015) foi voltado à elaboração de inventário espacial de emissões antropogênicas dos poluentes atmosféricos CO, NO_x, SO₂ e MP₁₀, da região metropolitana de Delhi, referente ao ano 2010. Foram analisados o padrão de uso da terra, a densidade populacional e as áreas industriais, consideradas as principais fontes de emissão da região. Os dados utilizados incorporaram fatores de emissão respectivos, informações de atividade de cada categoria de fonte e outras obtidas juntamente aos órgãos reguladores.

As indústrias somadas aos fornos de tijolos responderam por 28% das emissões de CO utilizando carvão, biomassa, coque e produtos petroquímicos como combustível. Enquanto isto para NO_x as usinas elétricas, fornos de tijolos e indústrias em geral representaram 22% das emissões. Os autores ainda definiram *hotspots* de emissão dos poluentes investigados por meio da distribuição espacial, sobre o domínio de estudo (SINDHWANI et al., 2015).

Sugui (2016) elaborou um inventário de emissão dos poluentes CO₂, CO, MP₁₀, NO_x, SO_x, e COV, do aeroporto internacional Afonso Pena, em São José

dos Pinhais, para o ano de 2015, considerando que o mesmo vem a ser um instrumento para a quantificação de fontes, o desenvolvimento de estratégias e medidas de redução. Para tal foram utilizados fatores de emissão específicos da atividade por meio de *software*. Os resultados indicaram que ainda que as emissões sejam concentradas, com risco de impactos locais, estas não são expressivas quando comparadas com àquelas da região metropolitana de Curitiba, onde está instalado o aeroporto.

Ainda aparecem diversos outros estudos que resultaram em inventários de emissões para diversas áreas de interesse. Wang et al. (2016) estabeleceram inventário de emissões de 18 perigosos poluentes do ar relacionados a indústria de ferro e siderurgia na China, levando em consideração tendências temporais e características de variação espacial.

Por sua vez Santos et al. (2016) utilizaram fatores de emissão do AP-42 para o estabelecimento de um inventário de emissões atmosféricas do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). O objetivo do estudo foi contribuir com a gestão e o monitoramento das emissões atmosféricas de fontes estacionárias em laboratórios. O trabalho resultou na apresentação de método de cálculo de emissões atmosféricas para institutos de pesquisa. Os autores apontaram que tal modelo poderia auxiliar na identificação e estabelecimento de medidas mitigadoras para controle da poluição atmosférica nestes locais.

Hassler et al. (2016) avaliaram as emissões de NO_x e CO em megacidades europeias e norte-americanas, com base em observações de longo prazo destes poluentes e no consumo de combustível. Além disto abordaram a aplicação de metodologias para a obtenção de inventários de emissões de longo prazo. O estudo ainda apontou para a necessidade de monitoramento e análises atmosféricas urbanas para viabilizar e avaliar criticamente inventários consistentes de emissões atmosféricas.

Em estudo desenvolvido por Wang et al. (2018) foi avaliado o potencial de redução de emissões de poluentes de uma indústria chinesa de produção de coque empregando fatores de emissão, com atenção especial para MP, COV, Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), CH_4 , CO, SO_2 e NO_x . Para a estimativa foram considerados os processos de produção, escalas corporativas, dispositivos de controle de poluição do ar e distribuição geográfica, para o período de 2012 a 2015. Foi evidenciado uma maior concentração de poluentes

na região norte da China, onde justamente encontram-se elevados níveis de produção de coque. A previsão de redução de emissões para o período compreendido entre 2016 e 2020 levou em consideração as tecnologias de produção e as restrições de emissão para a referida indústria.

Gao et al. (2019) utilizaram uma abordagem espacial e temporal para um inventário de emissões atmosféricas da indústria siderúrgica chinesa, considerada altamente poluidora, no período de 2005 a 2015. Os poluentes englobados foram SO₂, NO_x, MP em diferentes tamanhos e dibenzofuranos policlorados. A análise também buscou previsões de emissões futuras até 2020. Para determinação dos fatores de emissão foram considerados o consumo de matéria-prima, insumos de combustível, equipamentos de produção, tecnologias de controle de poluentes e economia de energia. O estudo identificou distinção entre as características das emissões por região, relacionada a produtividade industrial. Por fim, os autores apontaram a necessidade da disseminação de tecnologias de tratamento de poluentes atmosféricos para redução da poluição atmosférica.

Zhou et al. (2019) desenvolveram um inventário de fontes antropogênicas de poluentes do ar na província de Sichuan na China empregando fatores de emissão com tecnologia de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Hua et al. (2019) também elaboraram um inventário de poluentes de alta resolução para a cidade de Wuxi por considerar que inventários a nível de cidades são limitados.

O relatório de inventário de emissões atmosféricas do estado do Paraná elaborado em 2013, considerou dados do período compreendido entre 2003 e 2011 para 1415 empresas e suas 2.898 fontes monitoradas. Os poluentes abordados no estudo foram MP, CO, NO_x e SO_x. A cidade de Guarapuava recebeu destaque neste inventário estadual de emissões por ser o 4º município com o maior número de fontes monitoradas, com um total de 134 exemplares. Acima de Guarapuava estavam apenas Curitiba, São José dos Pinhais e Araucária (GRAUER, 2013).

2.4.6 Fatores de emissão atmosférica

Por vezes, para o preenchimento de lacunas em inventários são utilizados os fatores de emissão, em função da restrição de acesso a dados, inexistência ou impossibilidade de monitoramentos, os quais por sua vez forneceriam maior representatividade (DRISCOLL, FRIEDMAN, 2010; BANG, KHUE, 2019).

Aplicações dos fatores de emissão ocorrem na modelagem e análise de dispersão ambiental, estimativa de emissões específicas para inventários, rastreamento para investigações de conformidade, para o estabelecimento de critérios de permissão de operação, dentre outras (U.S.EPA, 2006).

A exigência e necessidade de fatores de emissão com maior qualidade é cada vez maior, isto porque o potencial impacto associado à sua utilização também é maior. O emprego dos fatores de emissão tem sido mais amplo, estendido ao desenvolvimento de estratégias de controle e redução de emissões, definição de atos regulatórios, limites de permissão e verificação dos efeitos das fontes (U.S.EPA, 2006).

Amaral et al. (2016) concluíram que o conhecimento de fatores de emissão contribui para o acompanhamento de sistemas de combustão e para o desenvolvimento de estratégias para o controle da poluição. Também podem servir como parâmetros em estudos sobre efeitos da poluição atmosférica à saúde e ao meio ambiente.

O AP-42 traz uma compilação de fatores de emissão de poluentes do ar, tendo sua versão inicial publicada em 1968 pela *United States Environmental Protection Agency* (U.S.EPA). O documento foi organizado em função das características e tipologia da fonte, é frequentemente revisado, atualizado e complementado. Antes de sua publicação os fatores são sempre disponibilizados para a revisão e comentários pelo público em geral.

Os fatores de emissão de poluentes do ar do AP-42 surgem a partir de testes, estudos de balanço de massa e estimativas de engenharia com vistas a assessorar na gestão da qualidade do ar (U.S.EPA, 1995).

O fator de emissão relaciona a quantidade de poluente emitido para a atmosfera com uma atividade pertinente, ou seja, normalmente representa o peso do poluente dividido por um volume, consumo de combustível, distância ou duração da atividade que libera o poluente. A representatividade é melhor para

emissões médias, de longo prazo, que consideram condições operacionais normais das fontes de emissão, nas quais são realizados os testes.

Os fatores do AP-42 recebem uma classificação por sua qualidade e confiabilidade, a qual é função do nível, qualidade e quantidade de informações e dados básicos, testes realizados acerca de um processo e a capacidade do fator em representar a emissão média anual para uma atividade. Os fatores de emissão oferecem limitação em representar com precisão os diversos processos e instalações. Entretanto, pela indisponibilidade de outros dados e pelo fato da sua obtenção ser dispendiosa, em situações onde o risco de efeitos ambientais adversos não é elevado, opta-se pelo uso destes fatores ou por modelos de emissão. Os fatores do AP-42 são classificados de A a E, como descrito a seguir, de forma que a classe A é considerada a melhor (U.S.EPA, 1995, p.9):

A - Excelente. O fator é desenvolvido a partir de dados de teste de fonte com classificação A e B, obtidos de muitas instalações escolhidas aleatoriamente na população da indústria. A população da categoria de fonte é suficientemente específica para minimizar a variabilidade;

B - Acima da média. O fator é desenvolvido a partir de dados de teste com classificação A ou B de um "número razoável" de instalações. Embora nenhum viés específico seja evidente, não está claro se as instalações testadas representam uma amostra aleatória da indústria. Como na classificação A, a população da categoria de fonte é suficientemente específica para minimizar a variabilidade;

C - Média. O fator é desenvolvido a partir de dados de teste com classificação A, B ou C de um número razoável de instalações. Embora nenhum viés específico seja evidente, não está claro se as instalações testadas representam uma amostra aleatória da indústria. Assim como na classificação A, a população da categoria de fonte é suficientemente específica para minimizar a variabilidade;

D - Abaixo da média. O fator é desenvolvido a partir de dados de teste com classificação A, B ou C de um pequeno número de instalações, e pode haver motivos para suspeitar que essas instalações não representam uma amostra aleatória da indústria. Também pode haver evidências de variabilidade dentro da população de origem;

E - Pobre. O fator é desenvolvido a partir de dados de teste com classificação C e D, e pode haver motivos para suspeitar que as instalações testadas não representam uma amostra aleatória da indústria. Também pode haver evidências de variabilidade dentro da população da categoria de origem.

2.4.7 Sistemas de Informação Geográfica - SIG

Sistemas de informação é o termo utilizado para representar a sistematização, digital ou não, do processo de transmissão de dados (informações) para o usuário. Esse processo depende de recursos humanos (*peopleware*), aparelhos, mecânicos analógicos ou digitais (*hardwares*) e processamento refinado (*softwares*) (O'HARA, WATSON, KAVAN, 1999).

Sistemas de Informações Geográficas (SIG) partem do mesmo princípio, capturar, armazenar, manipular, analisar, gerenciar e apresentar informações, porém sempre com um componente geográfico incutido. A estruturação destes dados em camadas de informação referenciada geograficamente a um sistema de coordenada terrestre configura um modelo de representação do mundo real (BURROUGH, MCDONNELL, 2015; MORAES, 2017).

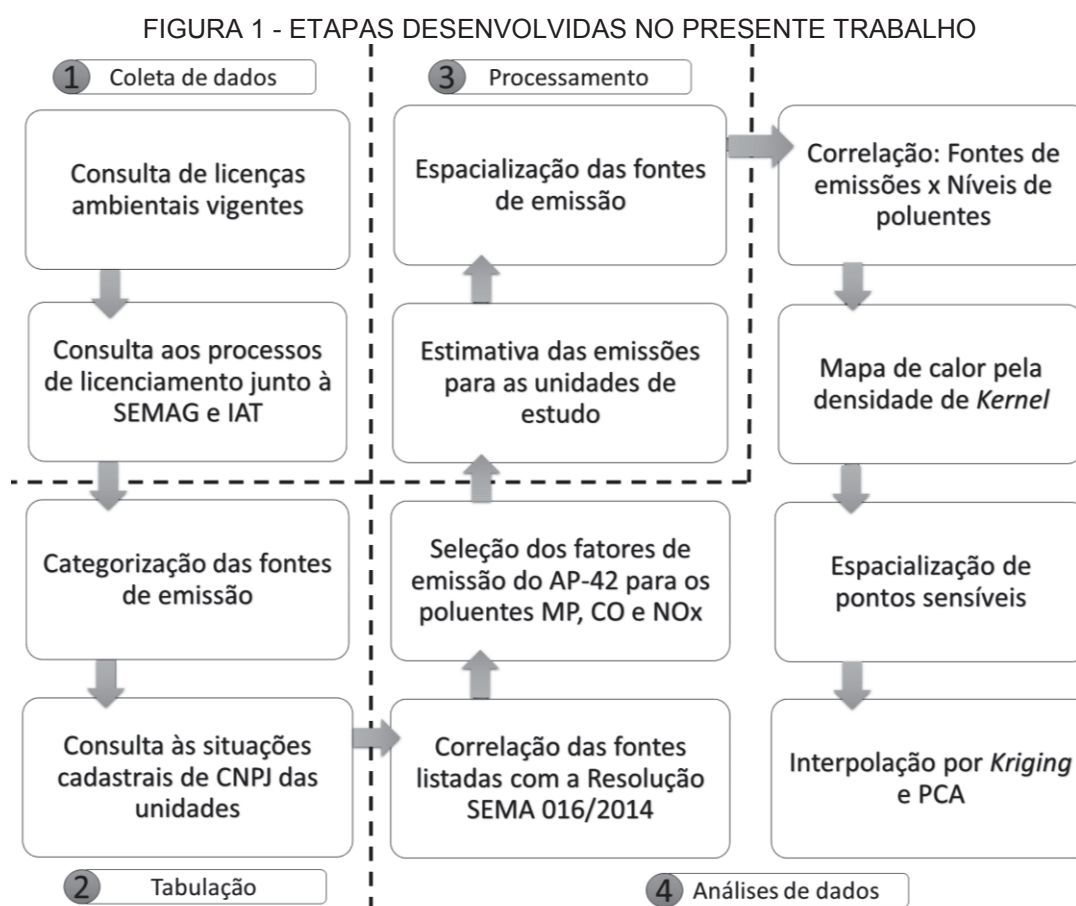
SIGs são ferramentas que permitem aos usuários criar consultas interativas de informações espaciais integradas com edição e manipulação de dados geográficos para a elaboração de mapas como produto final para apresentação de todas essas operações (MALIENE et al., 2011).

A estrutura de um software de SIG é feita conforme os dados que o mesmo processa, ou seja, os dados podem ser classificados como vetoriais e matriciais (*raster*). Os processamentos implementados baseiam-se em técnicas de geometria analítica e álgebra matricial, podendo existir diversos módulos ou bibliotecas para análises avançadas, como por exemplo o módulo de análises geoestatísticas.

Neste sentido diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de relacionar variáveis hidrológicas, meteorológicas, topográficas, ecológicas, sanitárias e ambientais dentro de ambientes de SIGs, sejam elas extraídas experimentalmente ou em observação a campo. O uso combinado dessas técnicas em modelos de dispersão de poluentes vem sendo extensivamente empregado em estudos ambientais. As aplicações ocorrem em pesquisas com foco nos efeitos produzidos por poluentes atmosféricos em escala regional-local ao meio ambiente, a saúde humana, na gestão da poluição atmosférica e da qualidade do ar (e.g. BATTERMAN, GANGULY, HARBIN, 2015; TEGGI et al., 2017; ZHU et al., 2017; DONG et al., 2020), bem como em diagnósticos complexos sobre problemas ambientais de caráter espacial (MORAES, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas desenvolvidas neste trabalho (FIGURA 1) contemplaram inicialmente a coleta de dados dos processos de licenciamento das indústrias, seguida de tabulação e categorização dos dados coletados. Os dados, disponíveis e estruturados, foram processados para dar início à confecção de mapas. Os dados processados finalmente foram analisados.



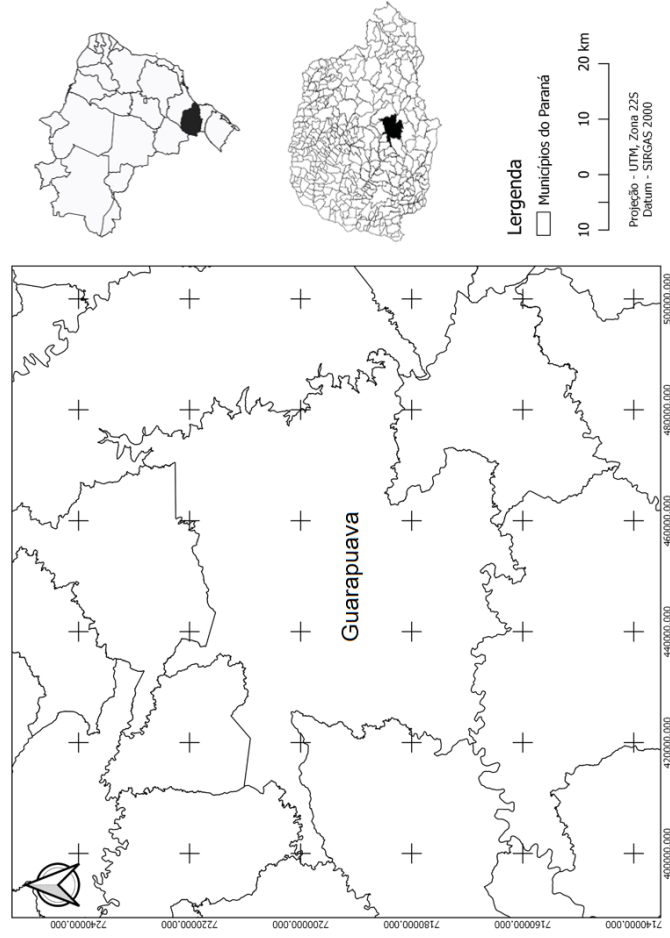
FONTE: O autor (2020).

O escopo do trabalho contemplou a determinação de emissões dos poluentes MP, CO e NO_x por fontes fixas de indústrias em operação e licenciadas no município de Guarapuava-PR, por meio do emprego de fatores de emissão do AP-42. A seguir é apresentado a delimitação dos procedimentos realizados para a composição do inventário de emissões atmosféricas, o qual foi estruturado e proposto como ferramenta de gestão ambiental.

3.1 LOCAL DE ESTUDO

O município de Guarapuava, local deste estudo, está situado na região centro-sul do estado do Paraná, no terceiro planalto paranaense, conforme apresentado na FIGURA 2.

FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA/PR



FONTE: Adaptado de ITCG (2019).

O município apresenta cerca de 167 mil habitantes e densidade demográfica de cerca de 54 hab./km² (IBGE, 2010). O clima local é Cfb, temperado com verão ameno, segundo a classificação de Wladimir Köppen, que considera a correlação entre o clima e a vegetação local (NITSCHKE et al., 2019).

3.2 DADOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL

A coleta e análise de dados utilizados no presente trabalho teve início com a consulta de licenças ambientais vigentes concedidas pelo IAT e SEMAG, no período compreendido entre novembro de 2019 e fevereiro de 2020, por meio de acesso ao item transparência pública disponível no *website* do IAT (2020), pesquisando por “estado e município”.

As informações obtidas foram dispostas em planilhas e classificadas por razão social, Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Comprovante de Inscrição e de Situação Cadastral (CNPJ), número da licença e validade. A categorização também ocorreu considerando a atividade principal, tipo da licença ambiental, fontes de emissão atmosférica declaradas na licença, tipologia da fonte (pontual ou fugitiva), localização das fontes em coordenadas, potência térmica nominal, produção típica de vapor, combustível e seu consumo, equipamento de remoção de poluentes, carga horária de funcionamento, os limites de emissão para os diferentes parâmetros (MP, CO e NO_x) e a frequência de monitoramento impostos pela licença ambiental ou exigidas pela resolução SEMA nº016/2014.

Adicionalmente por meio de contato direto e formalização do objetivo do trabalho, a SEMAG disponibilizou o acesso ao SGA, onde constam os dados dos processos de licenciamento do IAT e da SEMAG de forma unificada. Foram consultados e considerados os empreendimentos que tiveram seus pedidos de licença deferidos, cadastro inicial, solicitações em fase de complementação, e em fase de análise.

Por meio do SGA além das variáveis supracitadas, foi possível obter informações com relação a descrição das fontes de emissões, do combustível utilizado, sua potência térmica nominal ou produção típica de vapor de água, especificação de equipamento de controle ou tratamento de emissão atmosférica, carga horária de operação da fonte e dados da chaminé interligada à fonte.

3.3 OBTENÇÃO DE DADOS E PREENCHIMENTO DE LACUNAS

Devido a existência de lacunas para alguns dados foi necessário trabalhar na análise e compensação dos mesmos utilizando dados correlatos declarados, da seguinte maneira:

- Conversão de endereços dos empreendimentos para coordenadas geográficas;
- Para alguns casos era declarado o dado de potência térmica da fonte de emissão, enquanto para outros informava-se apenas o consumo de combustível ou a produção típica de vapor. Para os casos em que se informava apenas o valor de produção típica de vapor foi realizada conversão dos respectivos valores para uma aproximação de potência térmica. Isto se deu por meio da seguinte expressão (EQUAÇÃO 1):

$$Pot = \left(\frac{P_{vapor}}{1000} \right) * 0,96 \quad (1)$$

Sendo:

Pot: Potência térmica (MW);

P_{vapor}: Produção típica de vapor (kg vapor/hora).

- Para os casos em que o combustível utilizado era derivado de madeira o dado considerado para o cálculo foi a potência térmica nominal, isto devido a unidade do fator de emissão disponível;
- Os valores de potência térmica para os casos de combustível GLP e óleo, foram convertidos em consumo de combustível, conforme a EQUAÇÃO 2.
- Os valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) e da densidade dos combustíveis utilizados para os cálculos são apresentados no QUADRO 4.

QUADRO 4 - CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS COMBUSTÍVEIS

| Combustíveis | Poder calorífico inferior (PCI) (kcal/kg) | Densidade (kg/m ³) |
|-------------------------------|---|--------------------------------|
| Lenha ³ | 3.100 | 390 |
| GLP ³ | 11.100 | 552 |
| Óleo diesel ³ | 10.100 | 840 |
| Óleo de xisto ^{1,2} | 600 | 940 |
| Óleo combustível ³ | 9.590 | 1.000 |

FONTE: Adaptado de MESQUITA (1978)¹; PETROBRÁS (2019)²; EPE (2019)³.

A potência térmica nominal se refere à condição máxima de operação da unidade de geração de calor para as especificações de projeto, obtida a partir da EQUAÇÃO 2 (SEMA, 2014):

$$Pot = PCI * Comb \quad (2)$$

Sendo:

Pot: Potência térmica nominal do equipamento;

PCI: Poder Calorífico Inferior do combustível;

Comb: Quantidade de combustível queimada por unidade de tempo.

3.4 DADOS DO ZONEAMENTO MUNICIPAL

Os empreendimentos e pontos considerados sensíveis à poluição atmosférica, situados na área urbana do município, abrangeram escolas, unidades básicas de saúde, hospitais, Unidades de Conservação (UCs) e áreas de lazer, como parques e praças públicas. As respectivas informações locais foram obtidas por meio de arquivos *.shp* e *.dwg* do zoneamento da cidade, disponibilizados pela secretaria municipal de habitação e urbanismo, órgão gestor do Conselho do Plano Diretor de Guarapuava (CONCIDADE/GUARAPUAVA, 2017).

Os arquivos selecionados foram de macrozoneamento territorial, incluindo os distritos, com as divisões de uso e ocupação do solo. As UCs, em especial, foram obtidas de dados georreferenciados, em formato *.shp* do cadastro nacional de unidades de conservação (CNUC, 2020).

3.5 ENQUADRAMENTO DAS FONTES PONTUAIS DE EMISSÃO

A frequência de automonitoramento imposta na licença ambiental, em geral deve obedecer ao disposto na resolução estadual SEMA nº 016/2014, visto que o município não dispõe de legislação específica. Desta forma as fontes pontuais de emissão foram enquadradas nos padrões de emissão e frequência de monitoramento dispostos na referida resolução.

O ano de atualização dos dados cadastrais da empresa junto à receita federal foi considerado para a distinção entre fonte nova ou existente, a qual é necessária para o enquadramento na referida legislação. Para a obtenção desta informação utilizou-se o CNPJ de cada razão social, por meio de consulta ao endereço eletrônico da Receita Federal (2020).

3.6 APLICAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO AP-42

A partir dos dados coletados e organizados foram utilizados os fatores de emissão apresentados pelo AP-42 para a elaboração do inventário de emissões industriais do município de Guarapuava, com relação às emissões de MP, CO e NO_x. Os fatores de emissões utilizados foram aqueles que relacionam os diferentes tipos de equipamentos em atividades industriais aos respectivos combustíveis. O QUADRO 5 apresenta os fatores aplicáveis à combustão de GLP.

QUADRO 5 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA A COMBUSTÃO EMPREGANDO O COMBUSTÍVEL GLP E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO

| Combustível | Fator de emissão (kg/10 ³ L) | Classe do fator | Fator de emissão (kg/10 ³ L) | Classe do fator |
|------------------|---|-----------------|---|-----------------|
| Poluentes | CO | | NO_x | |
| GLP - Butano | 1,01 | E | 1,8 | E |
| GLP - Propano | 0,9 | | 1,56 | |
| Poluentes | MP filtrável | | MP condensável | |
| GLP - Butano | 0,024 | E | 0,072 | E |
| GLP - Propano | 0,024 | | 0,06 | |

FONTE: Adaptado de U.S.EPA (2008).

LEGENDA: Aplicável para caldeiras com capacidade de entrada de calor geralmente entre 10 e 100 milhões de Btu / hora.

Para os cálculos da carga de emissão relacionados à combustão com GLP a proporção de propano e butano considerada foi 1:1, já que não há restrição específica em termos de composição do GLP estabelecida pela ANP (2004).

O QUADRO 6 refere-se aos fatores para a combustão de madeira utilizados nos cálculos.

QUADRO 6 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO COMO COMBUSTÍVEL A MADEIRA E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO

| Combustível | Sistema de controle | Fator de emissão (10 ⁻¹⁰ kg/J) | Classe do fator | Fator de emissão (10 ⁻¹⁰ kg/J) | Classe do fator |
|---------------------------------|----------------------------|---|-----------------|---|-----------------|
| Poluentes | | CO | | NO_x | |
| Madeira seca | Nenhum | 2,58 | A | 2,11 | C |
| Poluentes | | MP filtrável | | MP condensável | |
| Madeira seca | Nenhum | 1,72 | A | 0,0731 | A |
| Madeira seca | Coletores mecânicos | 1,29 | A | | |
| Cascas ou madeira úmida ou seca | Precipitador eletrostático | 0,232 | B | | |

FONTE: Adaptado de U.S.EPA (2003).

LEGENDA: Coletores mecânicos abrangem ciclone, multiciclone e câmara de sedimentação.

Para determinar o fator de emissão de MP total foi considerado o somatório correspondente de MP filtrável e MP condensável.

Nas estimativas das cargas de emissão foi considerado em geral o uso de madeira seca, ou seja, com o teor de umidade inferior a 20% (U.S.EPA, 2003). Em termos das emissões de MP, o fator de emissão adotado para cada caso correspondeu ao equipamento de controle de emissão declarado.

Apesar de o AP- 42 informar que o fator de emissão CO para combustores de leito fluidizado é 0,17 lb/MMbtu, este não foi considerado já que não houve diferenciação entre as tipologias de caldeiras.

O AP-42 (U.S.EPA, 2010) ao delimitar os fatores de emissão para combustão com óleos combustíveis considera as categorias de óleos destilados

e óleos residuais estipuladas pela norma ASTM D396-19, conforme apresentado no QUADRO 7. Os óleos destilados são distinguidos nas classes nº 1 e 2, óleos residuais nº 5 e 6, e a classe nº 4 representa óleo destilado ou uma mistura de óleos destilados e residuais.

QUADRO 7 - FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA DO AP-42 PARA A COMBUSTÃO EMPREGANDO O ÓLEO COMBUSTÍVEL E RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO

| Tipo de óleo combustível | Porte da caldeira | Fator de emissão (kg/10 ³ L) | Classe do fator | Fator de emissão (kg/10 ³ L) | Classe do fator |
|--------------------------|-----------------------|---|-----------------|---|-----------------|
| Poluentes | | CO | | NO_x | |
| nº 6* | Acima de 100 MMBtu/h | 0,6 | A | 5,64 | A |
| nº 4 e 5* | | | | 5,64 | B |
| nº 2* | | | | 2,88 | D |
| nº 5 e 6 | Abaixo de 100 MMBtu/h | | | 6,6 | A |
| nº 4 e destilado | | | | 2,4 | A |
| Poluentes | | MP filtrável | | MP condensável total | |
| nº 6* | Acima de 100 MMBtu/h | [9,19 (S)+3,22]0,12 | A | 0,18 | D |
| nº 5* | | 1,2 | B | | |
| nº 4* | | 0,84 | | | |
| nº 2 | | 0,24 | A | | |
| nº 6 | Abaixo de 100 MMBtu/h | [9,19 (S)+3,22]0,12 | B | 0,18 | D |
| nº 5 | | 1,2 | A | | |
| nº 4 | | 0,84 | B | | |
| Destilado | | 0,24 | A | | |

FONTE: Adaptado de U.S.EPA (2010).

LEGENDA: *Condições normais de acionamento dos equipamentos com óleo.

Os fatores de emissão para a combustão de óleo residual são função do teor de enxofre do óleo combustível, em que S é a % em peso de enxofre no óleo.

A correspondência dos óleos combustíveis de interesse deste trabalho foi efetuada da seguinte maneira: óleo diesel encaixa-se nas classes nº 1 ou 2; óleo combustível BPF como óleo residual nº 5 ou 6 (CETESB, 2016); e óleo de xisto foi equiparado e enquadrado na classe nº 4, por não requerer preaquecimento para combustão (PERRY, CHILTON, 1980; ASTM, 2019), mas ainda assim ser caracterizado como líquido viscoso (PETROBRAS, 2019).

Para a estimativa de emissão de MP com o uso de óleo combustível BPF foi considerado o fator correspondente ao da classe de óleo nº 5, por não se ter especificação do teor de enxofre (S), informação necessária para óleos nº 6.

O consumo de combustível ou potência térmica nas fontes de emissão, obtidos conforme descrito no item 3.3, foram relacionados com os respectivos fatores de emissão para a obtenção das cargas de emissão de MP, CO e NO_x. A EQUAÇÃO 3 apresentada a seguir é recomendada pela U.S.EPA (2019) para a estimativa de emissão:

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (3)$$

Sendo:

E: Estimativa de emissão;

A: Taxa de atividade relativa ao equipamento;

EF: Fator de emissão;

ER: Eficiência de redução de emissão (%).

A eficiência de redução de emissão usual de MP esperada para os sistemas de controle (*ER*) já está incorporada nos valores dos fatores de emissão correspondentes a fontes que contenham sistema de controle de poluentes apresentados pela U.S.EPA (2003). Desta maneira a equação é simplificada, com a supressão do termo $\left(1 - \frac{ER}{100}\right)$. Para os casos onde não estava declarado um sistema de controle o termo *ER* da equação foi considerado como nulo.

3.5 ANÁLISE DE DADOS

No software QGis versão 3.4 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019) foram espacializadas as fontes instaladas no município de Guarapuava, por meio de suas coordenadas geográficas. Para cada ponto de localização das fontes pontuais de emissão foi correlacionado o respectivo nível de emissão de poluente previsto.

A distribuição dos níveis de poluição apresenta-se de uma maneira discreta entre as fontes de emissão. A aproximação dos valores e estabelecimento de uma condição de continuidade necessária foi efetuada por meio de interpolação, pelo método geoestatístico de *Kriging* (KRIGE, 1951).

Para a interpolação empregou-se uma *Triangulated Irregular Network* (*TIN*) com base na distância euclidiana entre os pontos, dados pela coordenada geográfica de cada unidade estudada. A interpolação dos dados pela triangulação dos pontos amostrados considerou um raio de 500 m.

Empregando-se a densidade de *Kernel* (PARZEN, 1962; ROSENBLATT, 1956) obteve-se um mapa de calor com os pontos de maior poluição pré-definidos. Com a distribuição espacial realizada destacou-se os pontos de maior emissão de poluentes do município e os pontos mais sensíveis à poluição. Em ambiente de SIG, as camadas foram sobrepostas, inclusive contemplando os dados do zoneamento municipal.

A Análise de Componentes Principais (ACP) de carácter exploratório (PEARSON, 1901), foi aplicada sobre os valores de carga de MP, CO e NO_x. Essa análise estatística multivariada baseia-se essencialmente na variância do conjunto de dados, rearranjando os eixos das variáveis por meio de novos eixos latentes (componentes), visando maximizar a variação e reduzir a dimensionalidade do universo amostral (BRUNSKILL, ROY, 2005). ACP é empregada em diversas áreas, inclusive no reconhecimento de pontos susceptíveis a poluição atmosférica (UL-SAUFIE et al., 2013; KUMAR et al., 2020).

Como critério de seleção das componentes principais geradas utilizou-se o critério de Broken-Stick, o qual compara os autovalores encontrados pela ACP com valores aleatórios para verificar e eliminar os componentes que apresentem um comportamento estocástico (JACKSON, 1993). O pacote “Stats” do software R3.6.3 (R CORE TEAM, 2020) foi empregado para estas análises.

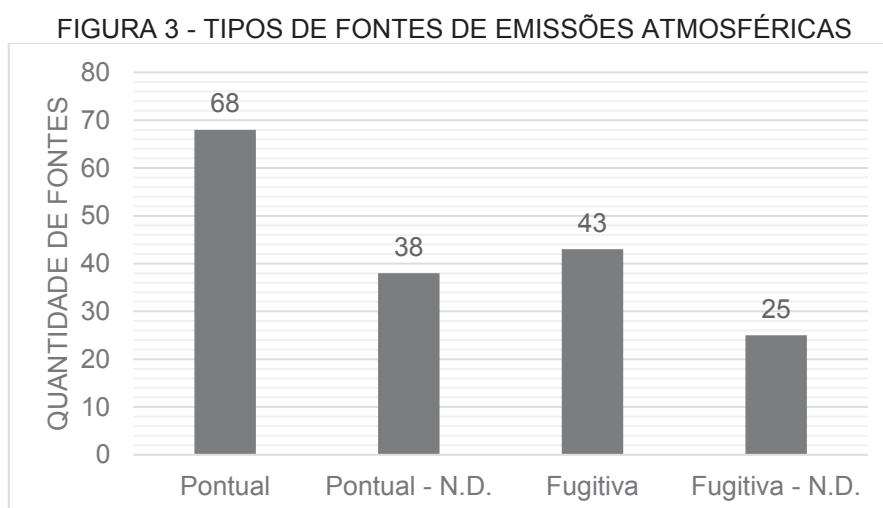
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUANTIFICAÇÃO DAS FONTES E ATIVIDADES INDUSTRIAIS

O levantamento de dados efetuado resultou na estruturação, classificação e análise de informações de 174 fontes emissoras de poluentes atmosféricos, distribuídas entre fontes pontuais e fugitivas, conforme apresentado na FIGURA 3. As fontes são pertencentes a 118 empresas que se encontram licenciadas, ou em fase de licenciamento junto ao órgão ambiental, no período deste estudo.

Esse quantitativo representa apenas 27% do total de 433 indústrias situadas no município, listadas pelo MTE (2018), o que indica possivelmente que grande parte das indústrias não estão com o licenciamento ambiental em dia. Uma eventual redução do número de indústrias ativas inicialmente não poderia ser considerada já que o município tem apresentado crescimento econômico nos últimos anos.

Tendo em vista que o universo amostral deste trabalho compreende uma pequena parcela do montante de indústrias em operação, possivelmente o número de fontes de emissão de poluentes atmosféricos é ainda mais relevante e, conseqüentemente, a carga poluidora local é potencialmente maior do que a estimada.



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: N.D. – Não disponível.

Quanto aos tipos de fontes houve a necessidade de se categorizar separadamente fontes que no processo de licenciamento não estavam disponíveis, atribuindo a estas a nomenclatura “Não Disponível (N.D.)”. Entretanto, ainda que não houvesse especificação para a fonte emissora, foram atribuídas fontes de emissões atmosféricas respectivas. Para estes casos o enquadramento acerca da tipologia da fonte ocorreu em função da atividade principal declarada na licença e a comparação com outras empresas da mesma categoria, que dispõe de fontes declaradas em seus processos. Quando estava atrelada à atividade o uso de um equipamento de combustão, foi condicionada uma fonte pontual, e quando o processo configurava alguma forma de liberação de MP, lhe foi atribuída uma fonte fugitiva.

As fontes pontuais são predominantes para as condições de estudo, representando 61% do conjunto de fontes de emissão. Em ambos os casos mais da metade das fontes não estão explícitas nas licenças. É notável o gargalo existente em termos da apresentação das fontes de emissão de poluentes atmosféricos nas licenças ambientais dos empreendimentos. Isto possivelmente reflete a necessidade de atenção do sistema em termos de acompanhamento, cadastro e fiscalização dos empreendimentos, ou até mesmo a orientação aos empreendedores quanto a declaração destas fontes ao órgão ambiental.

A relação das atividades em operação com as diferentes fontes de emissão atmosférica é apresentada no QUADRO 8.

QUADRO 8 - DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE EMISSÃO PONTUAIS E FUGITIVAS ENTRE AS ATIVIDADES LICENCIADAS DESENVOLVIDAS EM GUARAPUAVA

| Atividades | Quantidade de indústrias | Fontes pontuais | Fontes fugitivas |
|--|--------------------------|-----------------|------------------|
| Abatedouro | 2 | 2 | 0 |
| Armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos | 5 | 3 | 6 |
| Beneficiamento e armazenamento de produtos agrícolas | 16 | 4 | 29 |
| Crematório | 1 | 1 | 0 |
| Exploração, extração mineral e britagem | 9 | 1 | 15 |
| Fabricação de artefatos de cimento | 1 | 1 | 0 |
| Fabricação de artefatos de fibra de vidro | 1 | 1 | 0 |
| Fabricação de artefatos de material plástico | 4 | 4 | 0 |
| Fabricação de carvão vegetal | 9 | 3 | 7 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 6 | 7 | 0 |
| Fabricação e acondicionamento de pneumático | 3 | 3 | 0 |
| Fabricação, montagem e comércio de estruturas metálicas | 1 | 1 | 0 |
| Indústria alimentícia | 8 | 13 | 0 |
| Indústria da madeira | 36 | 30 | 6 |
| Indústria de papel e celulose | 3 | 8 | 1 |
| Indústria química | 8 | 14 | 2 |
| Metalúrgica | 1 | 1 | 0 |
| Produção de sementes certificadas | 1 | 0 | 1 |
| Serviço de saúde | 2 | 2 | 0 |
| Usina de asfalto | 1 | 7 | 1 |

FONTE: O autor (2020).

As fontes fugitivas contabilizadas, correspondem a pontos de carregamento e descarregamento de materiais que provoquem o desprendimento de poeiras, fornos caipiras ou caseiros, locais de corte e beneficiamento de madeiras, locais de denotação com explosivos, aterros sanitários entre outros. Estas atividades fazem parte dos processos vinculados às indústrias químicas, de madeira, carvão vegetal, papel e celulose, armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos, exploração, extração mineral e britagem, beneficiamento e armazenamento de produtos agrícolas e a produção de sementes.

Neste estudo foi evidenciado o predomínio de indústrias de madeira, alimentícia, química e de fabricação de cervejas, chopes e maltes, que dispõem de equipamentos com emissão pontual de poluentes atmosféricos. Esta condição está de acordo com os dados previamente apresentados sobre os

destaques da atividade industrial no município de Guarapuava (FIEP, 2017; GUARAPUAVA, 2019; IPARDES, 2020).

A tipologia da indústria à qual está vinculada o maior número de fontes pontuais é a indústria de madeira, e as fontes fugitivas ao beneficiamento e armazenamento de produtos agrícolas. A atividade de produção de sementes não apresentou unidades com emissão pontual. Contudo, as especificações dessas fontes nem sempre estão presentes de maneira explícita no processo de licenciamento ambiental.

Dentre as 68 fontes pontuais que estão disponíveis nas licenças ou processos de licenciamento, um total de 13 fontes pontuais não detalharam suas características, como descrição específica da fonte de emissão, valor da potência térmica, produção de vapor ou consumo de combustível. Devido à ausência destas informações não foi possível estimar a carga de emissão de MP, CO e NO_x associada.

Outras nove fontes pontuais não foram contabilizadas em termos de emissão de poluentes. São fontes sem combustão, desta vez devidamente especificadas. Esta exclusão se justificou pelos poluentes CO e NO_x estarem ligados diretamente a processos em que ocorre combustão.

Além disto, a estimativa de emissão de MP não foi possível porque não se dispunha de detalhamento sobre o processo e eficiência de controle vinculado, o que comprometeu a seleção de fatores de emissão do AP-42 que seriam apropriados. Essas nove fontes incluem fontes de exaustão de MP de moinhos de carvão, filtros de grãos, farinha, pó de madeira e jato de granalha. As fontes mencionadas são processos caracterizados, geralmente, por apresentar consideráveis taxas de emissão de material particulado, contudo a falta de dados comprometeu a inclusão destas fontes na estimativa de emissão delineada. Isto indica a possibilidade de ter ocorrido uma subestimação das cargas de emissão de MP neste trabalho em função da real carga poluidora no município.

Desta maneira, de um total de 68 fontes pontuais, são apenas 46 fontes cujas especificações estão detalhadas no licenciamento ambiental e permitiram sua análise quantitativa e a estimativa de suas emissões de MP, CO e NO_x. Quando ocorreu alguma lacuna dentre as variáveis, como “potência térmica”, “produção de vapor” ou “consumo de combustível” foram efetuados cálculos com

o intuito de se determinar as variáveis necessárias, com base nas demais e foi realizada a complementação, como observado no item 3.3.

4.2 MATERIAIS COMBUSTÍVEIS

Com relação ao combustível utilizado nos equipamentos com emissão pontual, como as caldeiras, aquecedores e fornos, a identificação não consta na licença ambiental dos empreendimentos, desta maneira os dados foram obtidos a partir do SGA interno da SEMAG.

Considerando o conjunto amostral das 46 fontes pontuais, um montante de 78% utiliza a madeira como material combustível, dentre eles, cavaco, lenha, biomassa, carvão vegetal, refil de madeira e serragem, isto em ordem decrescente de demanda por tipologia. Este dado reafirma a colocação anterior de que derivados de madeira ainda são amplamente utilizados no estado do Paraná.

O uso de derivados de madeira é comum em empresas que tem este material como resíduo ou subproduto, com o intuito de obter energia térmica e evitar problemas com a simplificação do descarte destes resíduos sólidos, obtendo como bônus uma fonte de calor de menor custo.

Em segunda posição está o GLP, com 13% de representatividade, demonstrando abertura e procura por novas opções de combustíveis no município. Interesse este provavelmente relacionado ao custo-benefício deste combustível em termos da eficiência de combustão e ao mesmo tempo da redução nos níveis de emissão de poluentes atmosféricos.

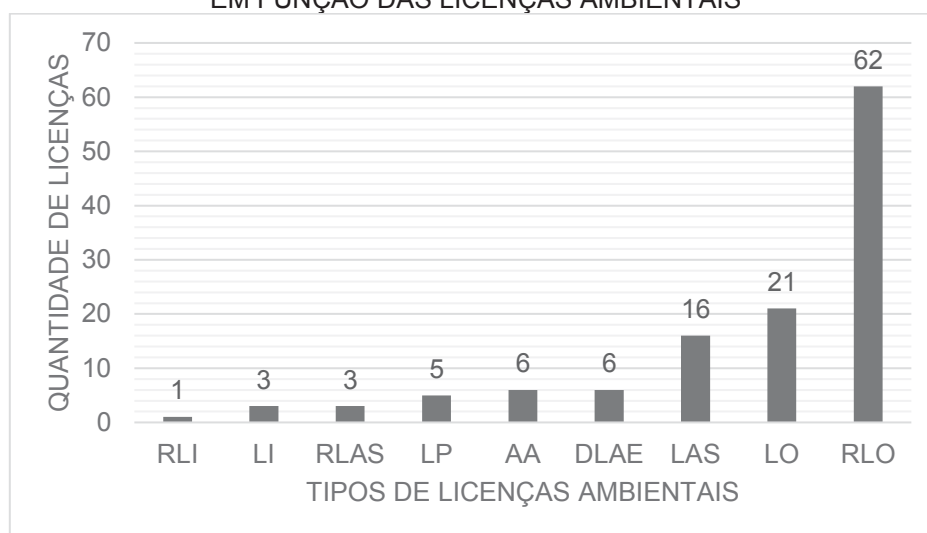
O óleo de xisto tem representação de uso de 5%. Já os óleos combustível e diesel assumem a última posição concomitantemente, com representação de 2% cada um deles. Este resultado indica que tais materiais estão sendo substituídos no ambiente industrial, inclusive o óleo de xisto, ainda utilizado em pequena proporção, em indústrias de Guarapuava.

4.3 LICENCIAMENTO E MONITORAMENTO AMBIENTAL

As categorias de licenças ambientais sob as quais os empreendimentos estudados estão enquadrados são: Dispensa de Licença Ambiental (DLAE),

Autorização Ambiental (AA), Licença Ambiental Simplificada (LAS), Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI), Licença de Operação (LO) e respectivas licenças de renovação. O histograma de frequência referente pode ser verificado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS EMPREENDIMENTOS AMOSTRADOS EM FUNÇÃO DAS LICENÇAS AMBIENTAIS



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Dispensa de Licença Ambiental (DLAE), Autorização Ambiental (AA), Licença Ambiental Simplificada (LAS), Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI), Licença de Operação (LO) e respectivas licenças de renovação (R).

Ao todo são 123 licenças ambientais para 118 empresas, isto se justifica já que um mesmo empreendimento pode obter mais de uma licença, algo a ser definido pela demanda e variabilidade das atividades realizadas. As categorias predominantes identificadas foram a LO e a Renovação de Licença de Operação (RLO), representando 67% de todas as licenças.

Como preconizam as resoluções CEMA nº 70/2009 e SEMA nº016/2014, a todos estes empreendimentos se aplica o automonitoramento de emissões atmosféricas. Independente da classe da licença ser mais simples ou complexa, dada a condição de potencial poluidor de um empreendimento, cabendo a este monitorar suas emissões.

O fato de a maior parte dos empreendimentos estarem licenciados com a RLO, ou estarem em fase de obtenção da mesma, indica que o órgão licenciador deve ter um histórico e informações pertinentes às características das fontes de emissão e dos poluentes emitidos. Isto porque os empreendimentos estão

condicionados ao automonitoramento e a apresentação dos respectivos relatórios, atendendo às regulamentações aplicáveis (CEMA, 2009; SEMA, 2014). Entretanto, mesmo que isto ocorra os dados não tem amplo acesso e sua utilização é restrita, o que por exemplo, compromete ou até mesmo inviabiliza questionamentos quanto a operação e locação dos empreendimentos licenciados, pesquisas na área, como é o caso do presente trabalho.

Devido ao fato do automonitoramento de emissões atmosféricas se aplicar a estes empreendimentos foi efetuado o enquadramento das fontes nos respectivos padrões de emissão, conforme disposições da resolução SEMA nº 016/2014.

Os limites de emissão predominantes para CO foram 6.000 mg/Nm³ para 11 fontes, 1.000 mg/Nm³ para oito fontes, todos para uso de madeira como combustível. Houve também oito casos em que o limite de emissão de CO foi inferior a 1.000 mg/Nm³, a saber, 80, 125 e 500 mg/Nm³ para combustão de GLP ou óleo. Para apenas um caso é exigido o monitoramento contínuo de CO com limite de 125 mg/Nm³, específico para o caso do crematório, de acordo com o art. 36 da resolução SEMA nº 016/2014. Fica evidente que os limites mais brandos são voltados para a combustão de derivados de madeira.

Em termos de NO_x, 33 unidades não estão condicionadas ao seu monitoramento pelos seguintes motivos: processos que queimam madeira com potência térmica inferior a 10 MW; combustão não externa de óleo com potência menor que 10MW, combustão de óleo em usinas de asfalto, ou GLP em forno crematório. Já para os processos que utilizam madeira com mais de 10 MW o limite passa a ser 500 mg/Nm³, para 7 unidades. O limite mais alto é de 1.600 mg/Nm³, exclusivo para processo que utiliza óleo diesel em usina de asfalto.

O limite aplicável ao MP em destaque é de 560 mg/Nm³, para 29 fontes, mas todas estas tratam-se de fontes com a combustão de derivados de madeira com potência inferior a 10 MW, às quais é aplicável a condição de monitorar CO ou MP, como forma de comprovar o controle das emissões, a critério do órgão ambiental licenciador (SEMA, 2014).

Já para as 7 fontes que queimam madeira com potência superior a 10 MW o limite é de 400 mg/Nm³. Para um caso de combustão não externa de óleo, com potência menor que 10 MW o monitoramento de MP não se aplica, assim como para os casos de combustão com GLP em geral como já mencionado. A esta

condição cabe a exceção do forno crematório instalado no município, limitado a emissão de 100 mg/Nm³ de MP. Para um caso de combustão externa de óleo diesel se aplica o limite de 300 mg/Nm³ de MP.

Os equipamentos de combustão avaliados têm potência térmica inferior a 100 MW. O equipamento de maior potência apresenta 54,6 MW, queimando óleo de xisto em usina de asfalto, cujo limite de emissão é restrito ao parâmetro material particulado total, de 90 mg/Nm³, segundo o art. 39 da resolução SEMA nº 016/2014. Este tipo de empreendimento sequer está condicionado por esta resolução, ao monitoramento de CO e NO_x. A falta de regulamentação a respeito traz consequências negativas em termos de meio ambiente e saúde pública, pois a falta do monitoramento dá condições para que o processo produtivo prossiga sem ao menos quantificar sua carga poluidora, e por conseguinte, geralmente não tende a atuar no sentido de minimizá-la. A poluição acaba sendo indiscriminada assim com os impactos resultantes.

Em termos da frequência de monitoramento das emissões, o empreendedor deve considerar aquela imposta pela resolução supramencionada ou a especificada na licença ambiental, observando sempre a de caráter mais restritivo. Dentre os resultados obtidos para as 46 fontes pontuais fixas, a frequência de monitoramento predominante foi semestral, em 63% dos casos e nos demais casos aplica-se a frequência anual.

Esta demanda compulsória de amostragens e ensaios de poluentes atmosféricos no município é significativa. Este processo deve ser continuado tendo-se em vista o aumento da necessidade por produtos industrializados, o desenvolvimento industrial regional e os potenciais impactos ambientais associados. A aplicação dos resultados referentes aos monitoramentos de emissões atmosféricas em uma plataforma de dados que permitisse a constante atualização e ampla divulgação, poderia resultar na melhoria significativa de sistemas de gestão ambiental, de saúde pública e planejamento urbano pertinentes, por exemplo.

4.4 CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Os equipamentos de controle de poluição atmosférica associados às fontes emissoras pontuais, vinculados e declarados nos processos de

licenciamento contemplam: câmara de sedimentação, ciclone, multiciclone, filtro manga, filtro cartão plissado, precipitador eletrostático e lavador. Todos os equipamentos listados são frequentemente empregados para remoção de MP (OMINE et al., 2017; EL-EMAM, DONG, ZHOU, 2019; VARSHNEY et al., 2020; XIONG et al., 2020), portanto, não foram considerados, em etapas de cálculos no estudo, como equipamentos de remoção em se tratando de CO e NO_x. O equipamento lavador de gases não foi contabilizado, visto que é utilizado em uma usina de asfalto, a qual não apresentava em seu processo de licenciamento dados que permitissem a estimativa das cargas de emissão associadas. Além disto o lavador era utilizado diretamente em equipamento misturador de agregados, cuja finalidade seria voltada principalmente para a remoção de MP.

Para as estimativas de emissão de MP foram selecionados os fatores de emissão condizentes a cada sistema de controle de MP declarado nas licenças. Não houve a necessidade de incorporar ao cálculo a eficiência de remoção dos equipamentos de controle, já que esta é incorporada nos respectivos fatores do AP-42, conforme apresentado no item 3.6. Além disto, a eficiência de remoção real dos equipamentos adotados pelos empreendimentos em estudo, não eram conhecidas, pois não são declaradas nos processos de licenciamento.

Vale destacar a necessidade e viabilidade da implementação de medidas preventivas e mesmo equipamentos de remoção específicos para poluentes gasosos nestes sistemas de combustão. Práticas de controle conferem maior qualidade no processo ou no mínimo a redução das taxas de emissão. Neste mesmo sentido, Gao et al. (2019) apontaram que para a redução eficaz de poluentes atmosféricos é necessário melhorar a disseminação e a acessibilidade de tecnologias de tratamento de poluentes e a descontaminação de alta eficiência.

Nas licenças ambientais dos empreendimentos não constam informações a respeito da existência, operação e eficiência de equipamentos de controle de poluição atmosférica, ainda que esteja declarada a fonte de poluição dentro do SGA e o respectivo equipamento. Esses dados foram acessados diretamente por consulta interna ao SGA da SEMAG/IAT, já que não houve acesso direto aos dados de projeto e detalhamento do próprio equipamento. Essa situação dificulta e compromete uma avaliação pública precisa com relação às medidas tomadas pelos empreendedores no sentido de minimizar impactos relacionados às

emissões atmosféricas de seus processos produtivos. O processamento destes dados e sua apresentação na forma de inventários de emissões poderia ser uma opção eficaz no sentido de minimizar essa lacuna e melhorar a qualidade das informações.

4.5 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

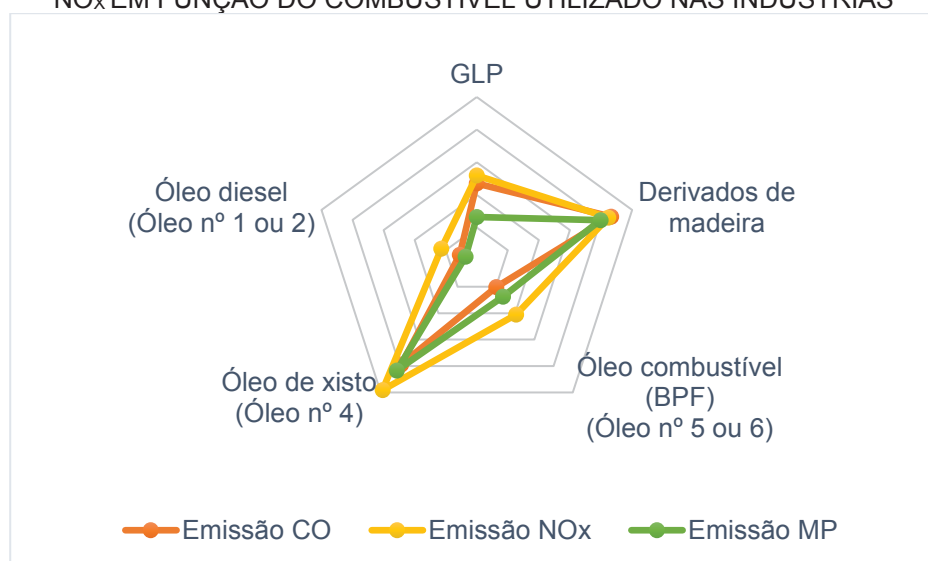
Nos casos em que não foi informado a potência térmica, produção típica ou consumo de combustível (13 fontes pontuais) não foi possível a determinação das cargas de emissão de MP, CO e NO_x.

As fontes fugitivas como não estão relacionadas a um consumo direto de combustível, bem como as fábricas de carvão vegetal, que em sua maioria não declaram o consumo de combustível, não tiveram suas emissões relacionadas aos fatores de emissão do AP-42. Desta forma houve apenas o levantamento do número de fontes e a análise de sua localização no município.

As estimativas de emissão de poluentes para as 46 fontes pontuais fixas, empregando os fatores do AP-42, resultaram em carga de CO de 298,36 kg/h, para NO_x 989,93 kg/h e para MP 243,07 kg/h. No ANEXO I é apresentado a compilação dos dados de estimativa para as fontes.

A FIGURA 5 e o QUADRO 9 ilustram como estão vinculadas estas cargas de emissão aos diferentes combustíveis empregados.

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE MP, CO E NO_x EM FUNÇÃO DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO NAS INDÚSTRIAS



FONTE: O autor (2020).

QUADRO 9 - CARGAS DE EMISSÃO DE POLUENTES POR TIPO DE COMBUSTÍVEL UTILIZADO NAS INDÚSTRIAS

| Tipo de combustível | Emissão MP (kg/h) | Emissão CO (kg/h) | Emissão NO _x (kg/h) |
|---|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| GLP | 0,21 | 2,25 | 3,96 |
| Derivados de madeira | 95,49 | 209,44 | 171,29 |
| Óleo combustível (BPF) (Óleo nº 5 ou 6) | 0,24 | 0,10 | 1,12 |
| Óleo de xisto (Óleo nº 4) | 147,11 | 86,53 | 813,41 |
| Óleo diesel (Óleo nº 1 ou 2) | 0,02 | 0,04 | 0,14 |
| Total (kg/h) | 243,07 | 298,36 | 989,93 |

FONTE: O autor (2020).

Ao analisar a FIGURA 5 e o QUADRO 9 é possível observar que a carga total de emissão de NO_x é a mais elevada quando comparada a carga dos demais poluentes. A emissão de NO_x é a mais elevada para o conjunto de combustíveis avaliados, com exceção dos derivados de madeira, para o qual se destaca a emissão de CO.

A discrepância maior ocorre para o uso de óleo de xisto, onde a emissão de NO_x (813,41 kg NO_x/h) é aproximadamente 4,7 vezes a carga associada a combustão de derivados de madeira, e corresponde a 82,2% do total de emissão de NO_x. Neste sentido cabe destacar que os derivados de madeira são aqueles que tem maior representatividade de uso no município (78%), enquanto o óleo de xisto é pouco utilizado, com uma parcela em torno de 5% de representação. Esta condição reflete justamente o elevado potencial poluidor deste combustível. A condição de menor emissão de NO_x pelo uso da madeira foi reconhecida também por Saidur et al. (2011) e REN et al. (2017).

A legislação ambiental (CONAMA, 2006) recomenda incentivos para medidas, como a troca dos combustíveis óleo e carvão por gás, que minimizem os impactos ambientais originais das fontes e apresentem ganhos ambientais comprovados. Uma possibilidade é até mesmo o estabelecimento de limites de emissão menos restritivos que aqueles estipulados pela própria resolução.

Quando comparadas as emissões dos poluentes de interesse vinculadas somente ao uso de xisto, o nível de NO_x é cerca de 5,5 e 9,4 vezes maior que a emissão de MP e CO, respectivamente. Isto corrobora com a colocação de Tong et al (2013), Jie e Bo (2016) e Chang et al. (2018), de que o óleo de xisto apresenta teor elevado de nitrogênio, e por conseguinte o fato de que a formação

dos compostos NO_x em processos de combustão decorre em maior proporção da presença de nitrogênio no próprio material combustível, além do nitrogênio proveniente do ar na câmara de combustão (SEINFELD, 1986; VERGNHANINI FILHO, 2016; GIODA, 2018).

A maior emissão de CO está relacionada ao consumo de madeira nos sistemas de combustão. O uso de derivados de madeira resulta em uma emissão de 70,2% (209,44 kg CO/h) do montante estimado para CO. A emissão de CO é reconhecida na literatura como evidenciaram Liu et al. (2018) e Kinoshita et al. (2020) por resultar da combustão incompleta de combustíveis carbonáceos.

Os combustíveis derivados de madeira apresentam como aspecto desfavorável um baixo valor de aquecimento e presença de umidade no material (SAIDUR et al., 2011; DE FUSCO, JEANMART, BLONDEAU, 2015), o que pode justamente comprometer as condições ideais da combustão e refletir em emissões elevadas de CO.

Qiu et al. (2014) em um inventário de emissões de alta resolução da planície central da China verificaram que os maiores contribuintes de emissões de CO foram as fontes de combustão estacionária, incluindo combustão industrial, uso comercial e residencial, além das fontes de combustão de biomassa.

Alguns autores como Wielgosinski, Łechtanska e Namiecinska (2017) asseguram justamente que a biomassa não é um combustível verdadeiramente ecológico, como se imaginava no princípio, isto em função da emissão elevada de alguns poluentes. Os mesmos autores afirmam que a emissão de alguns poluentes ao queimar biomassa é, por vezes, superior a combustão de carvão mineral. Para este trabalho o poluente destaque relacionado ao uso de madeira foi o CO.

A secagem de materiais de madeira previamente a combustão ou o armazenamento do combustível em local coberto, podem reduzir as chances de combustão incompleta e conseqüentemente minimizar a emissão de CO. Assim além de melhorar as características do efluente gasoso do processo pode-se reduzir custos relacionados a menor demanda por combustível, já que a produtividade térmica da madeira seca é melhor.

A emissão de CO vinculada ao óleo de xisto, observada neste trabalho, é responsável por 29% das emissões deste poluente, o que a torna significativa

pois o óleo de xisto é utilizado em apenas duas fontes. Isto reflete o fato de que o potencial poluidor deste combustível está associado não somente aos compostos NO_x .

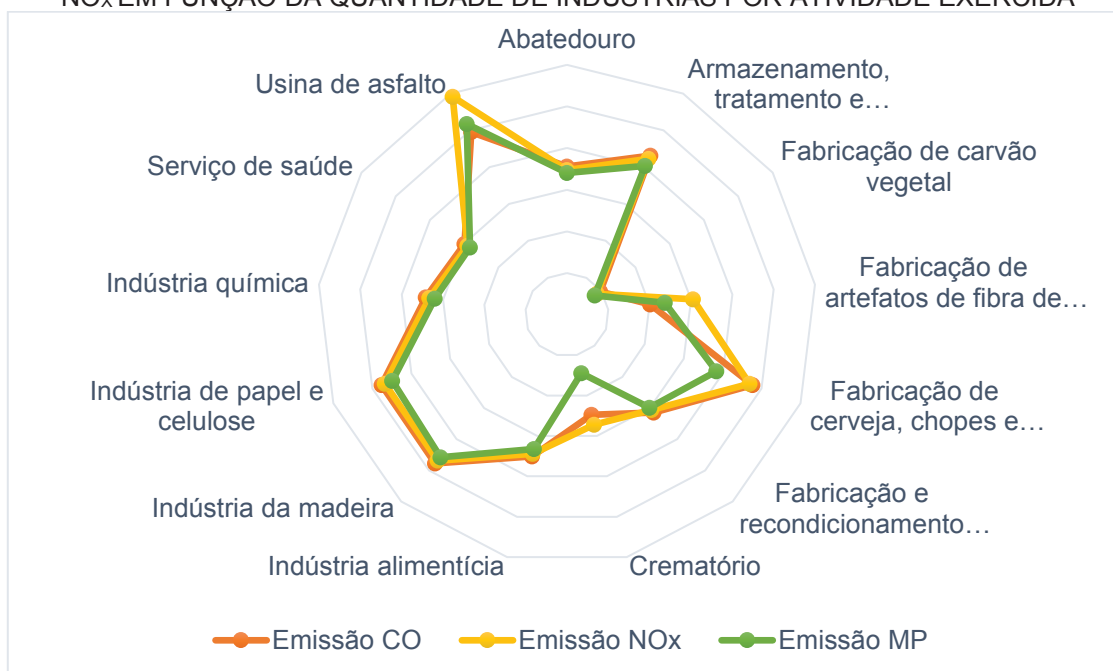
Quanto a emissão de MP o combustível que recebeu destaque também foi o óleo de xisto, representando 60,5% (147,11 kg MP/h) das emissões previstas para este poluente, enquanto isto o percentual correspondente para o uso de madeira é de 39,3%.

O óleo de xisto tem características semelhantes aos óleos residuais e, portanto, segundo Perry e Chilton (1980) e a ASTM (2019) apresentam quantidades significativas de cinzas. De acordo com Qiu et al. (2014) os processos industriais são as maiores fontes de emissão de MP, as quais ocorrem em função do teor de cinzas do combustível utilizado, o que concorre com os resultados obtidos. Contudo, Simoneit (2002), Zhao et al. (2015) e Garbaras et al. (2015) verificaram, por revisão bibliográfica, estimativas e simulações em laboratório, que a combustão de biomassa geralmente é a principal fonte de MP, o que contrapõe os resultados estimados neste estudo.

O consumo de óleo diesel como combustível (2%) esteve correlacionado as menores emissões para os três poluentes estudados, proporcionalmente a demanda por combustível. Em segunda posição para as menores emissões de MP e NO_x está o GLP, com seis unidades em operação. Este combustível de fato recebe destaque por geralmente apresentar reduzidas emissões destes poluentes (AMORIN et al., 2018; COELHO et al., 2018; PETROBRÁS, 2019a; IANNIELLO et al., 2020).

As proporções de emissões estimadas por atividades industriais investigadas são apresentadas na FIGURA 6 e QUADRO 10.

FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DOS DADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE MP, CO E NO_x EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE INDÚSTRIAS POR ATIVIDADE EXERCIDA



FONTE: O autor (2020).

QUADRO 10 - CARGAS DE EMISSÃO DE POLUENTE DISTRIBUÍDAS ENTRE A QUANTIDADE DE INDÚSTRIAS QUE DESEMPENHAM DIFERENTES ATIVIDADES

| Atividade | Quantidade de indústrias | Emissão MP (kg/h) | Emissão CO (kg/h) | Emissão NO _x (kg/h) |
|--|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| Abatedouro | 1 | 2,52 | 3,62 | 2,96 |
| Armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos | 1 | 10,80 | 20,43 | 16,71 |
| Crematório | 1 | 0,03 | 0,30 | 0,53 |
| Fabricação de artefatos de fibra de vidro | 1 | 0,24 | 0,10 | 1,12 |
| Fabricação de carvão vegetal | 1 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 4 | 6,92 | 58,67 | 48,99 |
| Fabricação e acondicionamento de pneumático | 2 | 0,97 | 1,39 | 1,14 |
| Indústria alimentícia | 8 | 2,12 | 3,20 | 2,78 |
| Indústria da madeira | 11 | 37,92 | 59,68 | 48,81 |
| Indústria de papel e celulose | 2 | 30,62 | 57,96 | 47,40 |
| Indústria química | 7 | 1,57 | 2,60 | 2,13 |
| Serviço de saúde | 2 | 0,68 | 0,98 | 0,81 |
| Usina de asfalto | 5 | 148,68 | 89,42 | 816,55 |
| Total | 46 | 243,07 | 298,36 | 989,93 |

FONTE: O autor (2020).

A atividade usina de asfalto apresentou os maiores índices de emissão para os três poluentes, MP (61%), CO (30%) e NO_x (82%), e isto está relacionado prioritariamente ao emprego do óleo de xisto em apenas duas das unidades

instaladas. Estas unidades correspondem a potência térmica típica de 94,6 MW, de um total de 102,78 MW, representado pelo conjunto das seis usinas de asfalto contempladas. Na sequência, aparece a atividade fabricação de cerveja, chopes e maltes com emissão de NO_x (5%) e a indústria da madeira para CO (20%) e para MP (16%).

Como evidenciado na FIGURA 6, considerando a proporcionalidade e a distribuição uniforme das emissões pelo número de empresas recebe destaque também a indústria de papel e celulose, a qual assume o maior nível de emissão de CO, 29 kg/h.ind. Além disto, a indústria de papel e celulose está na segunda posição para emissão de MP (15,3 kg/h.ind) e NO_x (23,7 kg/h.ind), ficando atrás somente das usinas de asfalto.

As menores emissões corresponderam à atividade de fabricação de carvão vegetal, cuja única fábrica apresenta emissão estimada de 0,01 Kg/h.ind para cada um dos poluentes.

Informações adicionais sobre as estimativas efetuadas para as fontes pontuais devidamente declaradas nas licenças (46 fontes) estão descritas no ANEXO I.

Alternativas para a redução das elevadas emissões de poluentes podem abranger a adoção de sistemas de controle de fim de tubo com maior eficiência, associação de tecnologias distintas de controle, ajustes no processo produtivo com minimização de fontes fugitivas, substituição de matérias-primas, delineamento de planos de manutenção e controle mais rigorosos e a própria troca do combustível, a qual inclusive é incentivada pelas regulamentações ambientais.

Ao longo dos últimos anos existe uma preocupação crescente e iniciativas voltadas à substituição de combustíveis fósseis. Hein e Bemtgen (1998) relataram sobre o projeto europeu, no qual foi testado a co-combustão de biomassa e carvão, visando a redução de emissões de gases de combustão e a substituição de combustíveis fósseis.

Tendo em vista a redução das emissões relacionadas a combustão de óleo de xisto, a sua substituição e a adoção de sistemas de controle de gases e particulados mais eficientes com plano de manutenção estabelecido seriam potenciais medidas eficazes para tal.

Georgiopoulou e Lyberatos (2017) estudaram o uso de combustíveis alternativos em substituição aos combustíveis fósseis como carvão e coque, em fornos de clínquer. Ao empregarem a metodologia de avaliação do ciclo de vida, os resultados mostraram a minimização de impactos ambientais associados à combustão de combustível derivado de resíduos, incluindo madeira, papéis, têxteis e plásticos.

Dentre os fatores de emissão utilizados, os pertencentes as classes D e E não oferecem dados e informações representativas, são apenas uma noção dos processos relacionados. Fatores que recebem estas classificações pelo AP-42, e que foram utilizados são: GLP para os três poluentes; óleos combustíveis para MP condensável total; e óleo nº 2 para NO_x, considerado corresponde ao óleo diesel por ser destilado.

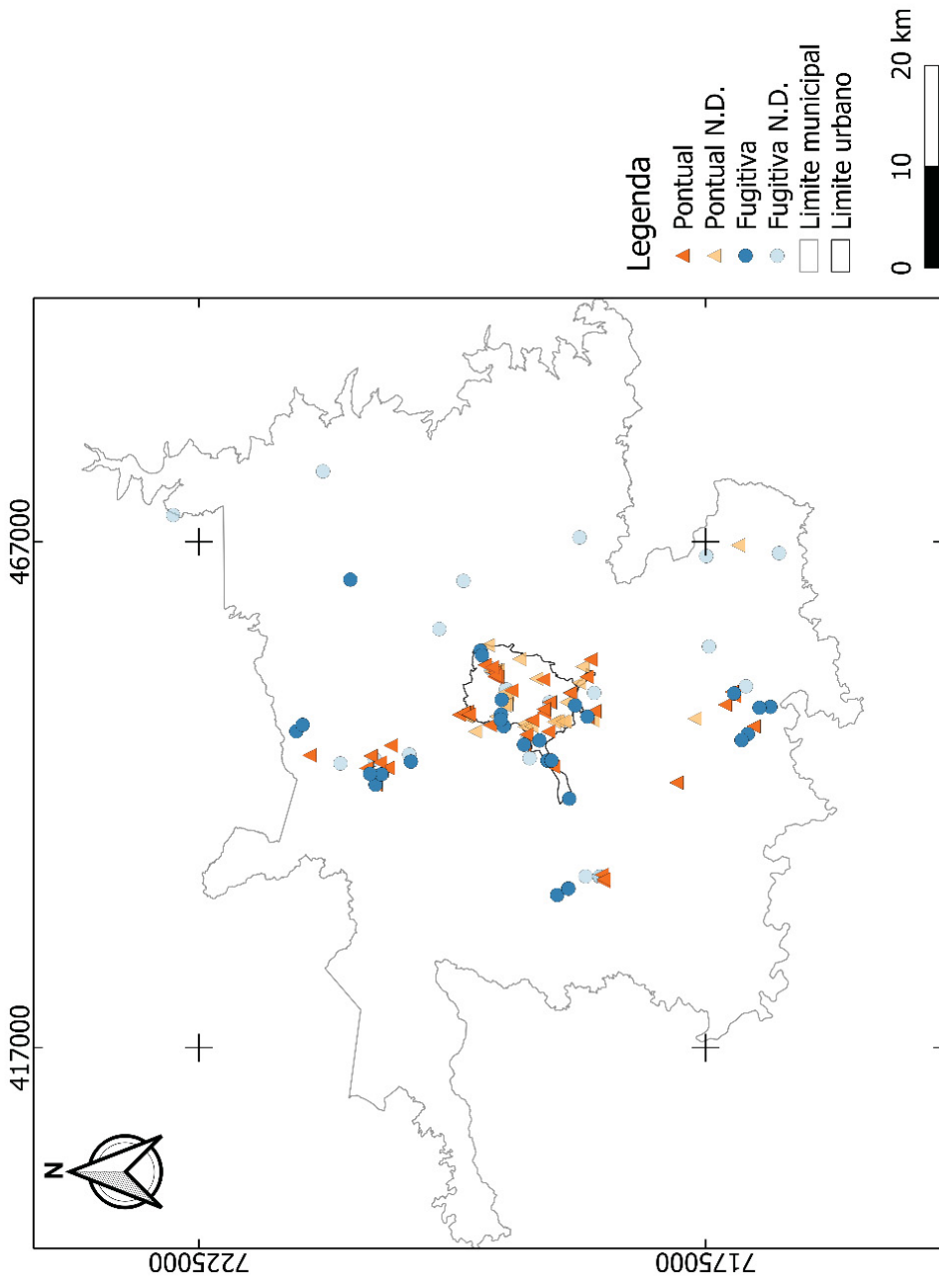
4.6 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O termo espacializar significa criar uma referência espacial a um objeto ou a um evento. Neste trabalho as referências tomadas são os limites geográficos do município de Guarapuava, seu zoneamento urbano, as diferentes fontes de poluição estudadas e as unidades consideradas susceptíveis aos impactos associados à poluição atmosférica.

A FIGURA 7 apresenta a situação geográfica de uma parcela de 165 unidades emissoras pontuais e fugitivas de poluentes atmosféricos, conforme as licenças ambientais consultadas, em relação aos limites geográficos do município de Guarapuava e a delimitação de sua área urbana.

Uma amostra de nove fontes, dentre elas cinco fontes fugitivas e quatro pontuais, não foram apresentadas em termos de mapeamento em função da inexistência de coordenadas geográficas referentes a localização das mesmas no processo de licenciamento ambiental, e pelo fato do endereço indicado estar incompleto.

FIGURA 7 - MAPA DA SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DE FONTES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA PONTUAIS E FUGITIVAS LICENCIADAS EM GUARAPUAVA-PR



FONTE: O autor (2020).

Na FIGURA 7 é possível notar a predominância das fontes pontuais. Ao avaliar o adensamento das fontes estudadas é perceptível a maior concentração das fontes emissoras de poluentes atmosféricos junto a região urbana do município e aos distritos da Palmeirinha e Entre Rios, situados ao norte e ao sul da área urbana do município sede, respectivamente. As fontes pontuais estão instaladas principalmente em área urbana, e as fontes fugitivas encontram-se, em sua maioria, dispersas nas zonas rurais.

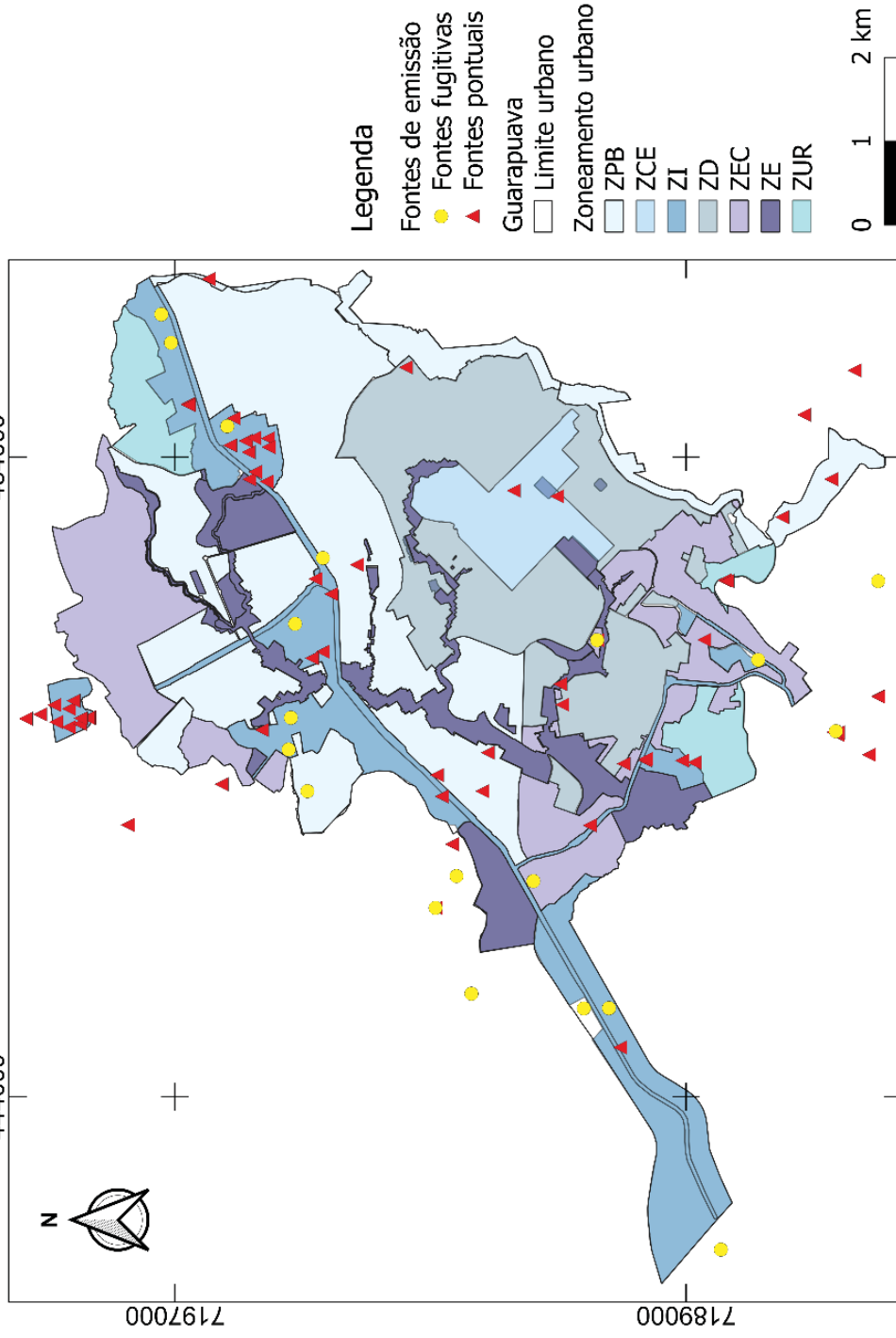
De modo semelhante a maior concentração dos poluentes MP, CO e NO_x ocorreu na área urbana e suburbana em inventário elaborado por Qiu et al. (2014) para a planície central da China, justamente porque estes poluentes são altamente dependentes do nível de atividade das indústrias localizadas predominantemente em área urbana, onde existe uma elevada densidade populacional. Situação similar também é verificada neste trabalho, o que se justifica pela elevada concentração de fontes, as quais nas áreas urbana e suburbana, em geral, apresentam potencial poluidor mais elevado.

4.7 EMISSÕES E O ZONEAMENTO URBANO

No intuito de aprimorar a interpretação do adensamento e o posicionamento das fontes existentes, no mapa apresentado na FIGURA 8 pode-se observar como estão distribuídas as fontes de emissão de poluentes atmosféricos, pontuais e fugitivas, com relação as áreas urbanas do zoneamento do distrito sede de Guarapuava. Zoneamento este estabelecido pelas leis municipais complementares nº 69/2016, 76/2017 e 101/2018.

A análise da FIGURA 8 permite identificar as regiões no município que oferecem menor vulnerabilidade a ter prejuízos com a instalação de novos empreendimentos com potencial poluidor maior, bem como àquelas mais susceptíveis à impactos.

FIGURA 8 - MAPA DE FONTES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA E ZONEAMENTO DO PERÍMETRO URBANO DO DISTRITO SEDE DE GUARAPUAVA-PR



FONTE: Adaptado de CONCIDADE/Guarapuava (2017).

LEGENDA: Zona de Proteção de Bacia (ZPB), Zona Central Estendida (ZCE), Zona Industrial (ZI), Zona de Densificação (ZD), Zona de Expansão Controlada (ZEC), Zona Especial (ZE), Zona Urbana com Características Rurais (ZUR).

Na FIGURA 8 verifica-se que a maior concentração de fontes pontuais ocorre justamente nas Zonas Industriais (ZI), o que está previsto na lei de zoneamento municipal. Contudo, ainda se observa a presença de unidades industriais com fontes pontuais nas Zonas Central Estendida (ZCE), de Expansão Controlada (ZEC), de Densificação (ZD) e Zonas de Proteção de Bacias (ZPB). Enquanto as fontes fugitivas estão distribuídas entre as Zonas Industrial; de Proteção de Bacias e Especiais (ZE).

As ZCE e ZD, conforme previsto pelas regulamentações pertinentes, tem por característica uma maior concentração populacional com função habitacional, comercial e de prestação de serviços. Esta condição repercute em maior potencial impacto associado à presença de indústrias.

A ZEC apresenta condições de adensamento mais restrita em comparação às anteriores, dado a disponibilidade de infraestrutura e a necessidade de diversificação de uso.

As ZPB também possuem maiores restrições em termos de adensamento, justamente por suas condições de maior sensibilidade ambiental. Em 2017 a ZPB do Rio Cascavel teve novas subdivisões alteradas pela lei nº 76/2017, transformando parte dela em uma ZI. A respectiva parcela já sofria intensa influência de ZI previamente estabelecida no entorno da ZPB. A pressão oferecida pelo crescimento industrial no município, no período que antecedeu a referida legislação, ou seja, entre 2007 e 2017 (IBGE, 2017a), repercutiu nesta alteração.

A ZPB do Rio das Pedras é uma área ainda mais restritiva em termos de novas instalações industriais e, portanto, requer um estudo prévio específico para sua liberação, inclusive proibindo diversas tipologias, consideradas de maior risco. Para indústrias já instaladas regularmente existe a necessidade de licenciamento atrelado a termos de ajuste de conduta, o qual deve incluir prazo para alteração de localização.

As ZE são caracterizadas por restringirem seu uso e ocupação para a proteção, manutenção e recuperação de aspectos ambientais, paisagísticos, históricos e culturais. Estas incluem entornos de praças, parques e áreas de lazer, bem como áreas de projetos específicos, de interesse público e social para a urbanização, regularização jurídica e programas habitacionais. Desta forma a presença de empreendimentos industriais fica limitada pelo risco associado.

Entretanto, especificamente nas áreas circundantes a Estações de Tratamento de Efluentes o uso é restrito a loteamentos com fins industriais.

A análise espacial conjunta de fontes de emissão e das condições de uso e ocupação do solo, permite o reconhecimento de locais mais sensíveis em termos de risco vinculado a poluição atmosférica, conforme relataram também Qiu et al (2014) e Santos et al. (2016).

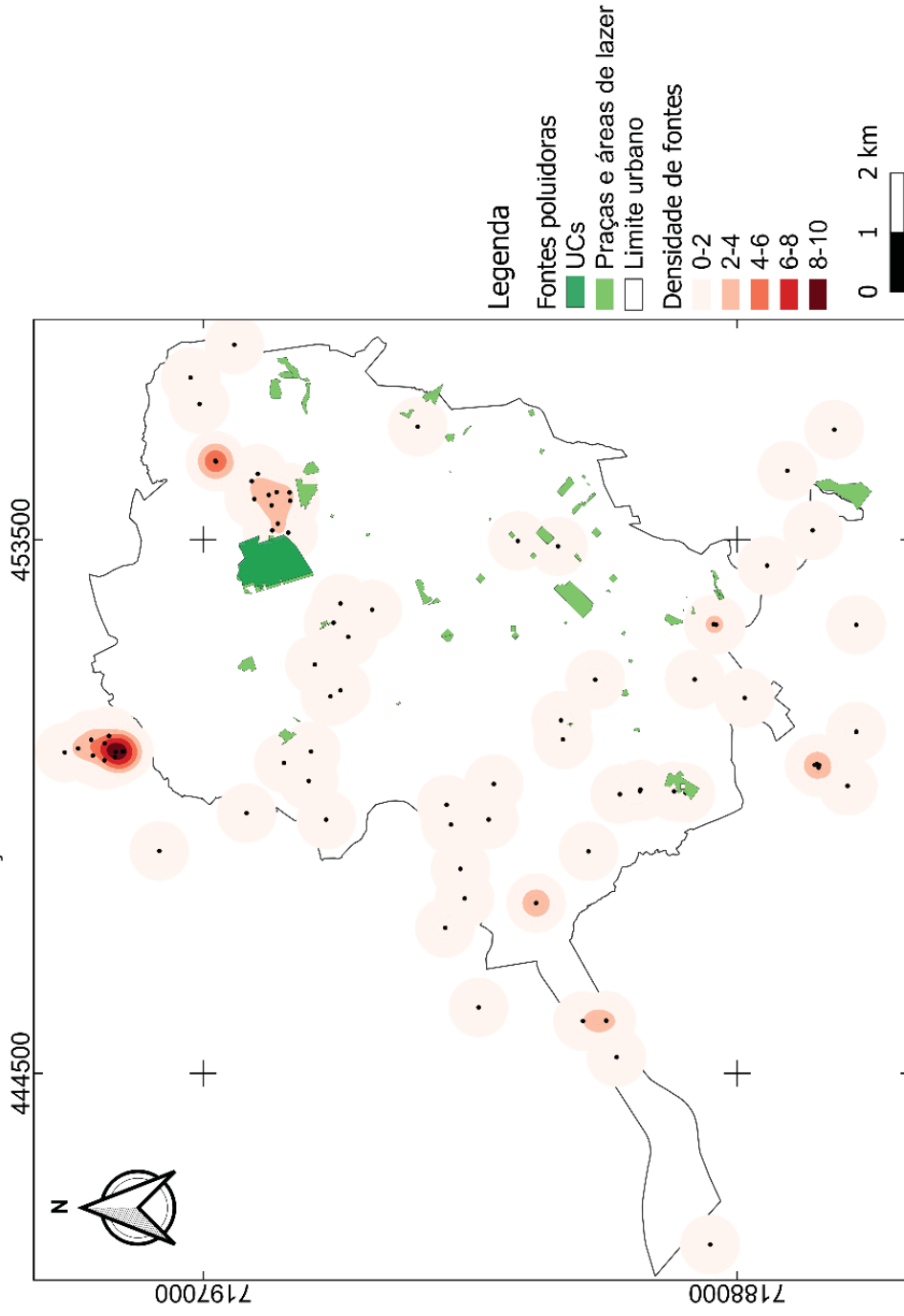
Neste sentido as ZPB e ZE, com maior sensibilidade, e as ZD, ZEC e ZCE, com maior adensamento populacional, seriam as regiões onde a instalação de novas indústrias e a ampliação das existentes deve ser algo minuciosamente estudado, e ter a sua viabilidade questionada. Desta forma, entende-se que as informações apresentadas e a caracterização efetuada podem ser de grande importância para o licenciamento ambiental.

A associação do mapeamento de localização de fontes ao zoneamento urbano municipal, permite um maior discernimento sobre a viabilidade de instalações de novos empreendimentos em regiões específicas do município. Por fim vale ressaltar que a maior concentração de unidades poluentes não deve estar próxima a aglomerados habitacionais e pontos sensíveis, sejam estes em termos de saúde pública ou preservação ambiental.

4.8 EMISSÕES E RECEPTORES SENSÍVEIS

Foram elaborados mapas de calor utilizando a densidade de *Kernel*, a partir de interpolação pela triangulação dos pontos amostrados em um raio de 500 m. Para a interpolação foi considerada a densidade ou proximidade de fontes de poluição, situadas na área urbana e em seu entorno próximo. Esta análise simula a influência dos pontos de fonte de poluição em função da sua proximidade. O resultado de *Kernel* é um arquivo *raster*, ou seja, uma matriz de informações na forma de *pixels*. Em seguida, foram relacionados as regiões de maior concentração de fontes de emissão com receptores de maior sensibilidade, a saber, áreas verdes e praças (FIGURA 9), centros educacionais (FIGURA 10) e unidades de saúde (FIGURA 11).

FIGURA 9 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO, ÁREAS VERDES E PRAÇAS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).
 LEGENDA: UCs - Unidades de conservação.
 Densidade de fontes - relação com o número de fontes na área de influência de 500 m.

A vetorização dos mapas de calor foi efetuada e estabelecido o fatiamento em classes considerando a densidade de fontes de emissão em um raio de 500 m. Isto permitiu a reavaliação da proximidade de pontos sensíveis e o grau de influência potencial da poluição sobre estes. A distância de 500 m adotada neste trabalho pode ser considerada representativa em termos de influência de emissões atmosféricas. Não há uma especificação quanto a esta distância, cuja qual é variável em função do tipo de poluente e da fonte de emissão (WALKER et al., 1999; ZHOU, LEVY, 2007; SEMA, 2014; DENG et al., 2016).

As áreas em destaque na FIGURA 9 compreendem parques, praças e UCs. Ao norte do limite urbano destaca-se a presença da UC Parque Natural Municipal das Araucárias juntamente com uma elevada concentração de indústrias que possuem fontes de emissão. Entretanto, considerando a área de influência adotada neste trabalho, esta UC ocorre na primeira classe (0-2), ou seja, sob influência de no máximo duas fontes.

Existem outras 14 áreas, entre praças e locais de lazer, que estão situadas na região de influência das fontes de emissão, em função da densidade de *Kernel* com raio de 500m. Estas áreas também estão dentro das delimitações da região de influência de até duas fontes.

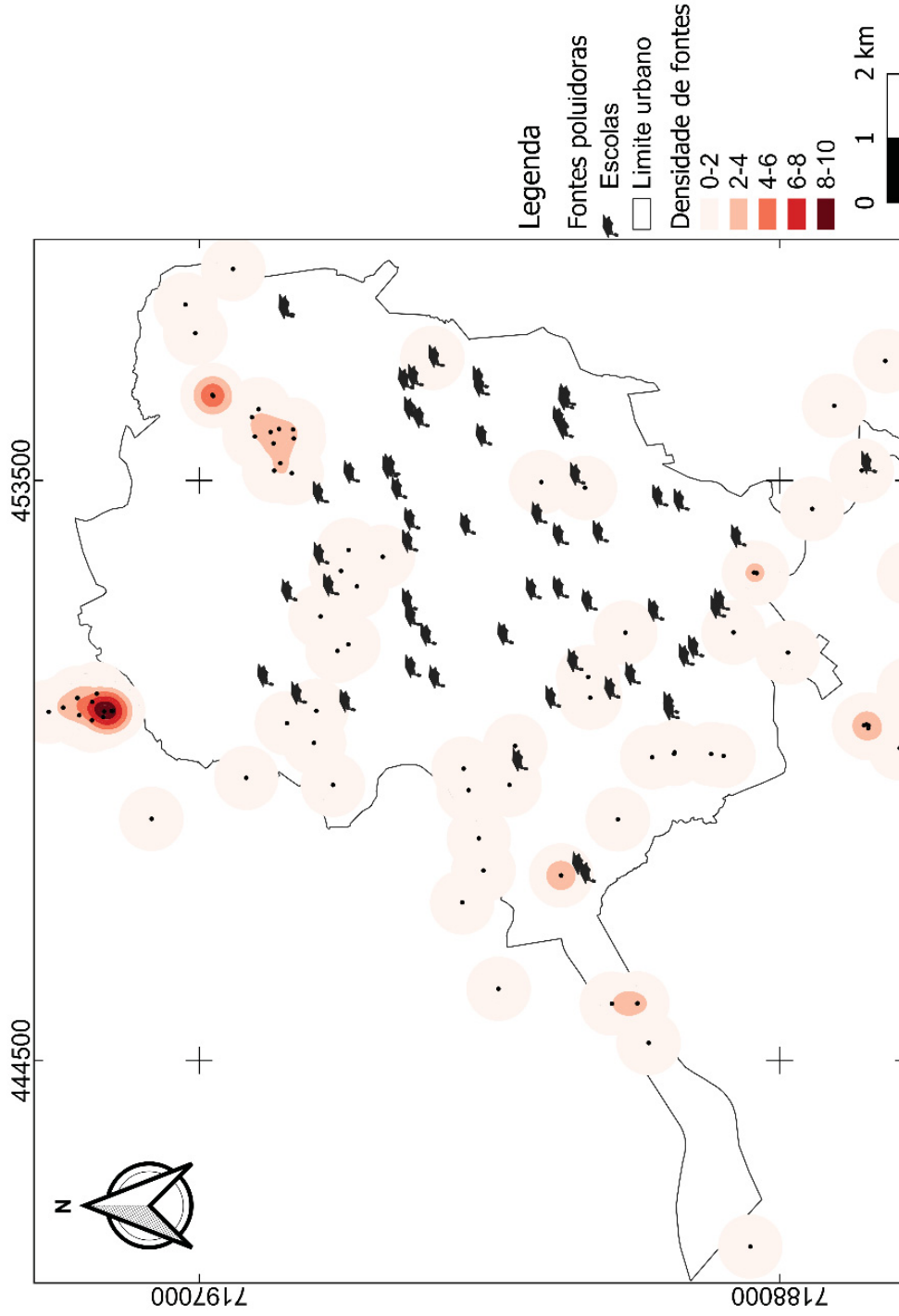
Nas delimitações do município aparece também o Parque Estadual da Serra da Esperança, ao leste da área urbana, onde encontra-se inserida uma fonte de emissão fugitiva de indústria de exploração, extração mineral e britagem.

Diversos estudos na literatura evidenciaram o fato de que a poluição atmosférica oferece riscos à vegetação, seja no reestabelecimento e no crescimento de indivíduos, na funcionalidade das florestas, ou em impactos relacionados ao poluente secundário O₃, e diretamente aos poluentes NO e MP (FUSARO et al., 2015; COTROZZI et al., 2017; LI et al., 2017; NOBLE et al., 2017; OCHOA-HUESO et al., 2017; GENTILESCA et al., 2018; LEFOHN et al., 2018).

Cabe ainda considerar o fluxo de pessoas nos locais de lazer, principalmente de crianças e idosos, os quais apresentam naturalmente maior sensibilidade, o que acaba por potencializar os impactos da poluição.

A FIGURA 10 evidencia a distribuição das escolas e das fontes de poluição de interesse, na área urbana.

FIGURA 10 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO E CENTROS EDUCACIONAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).
 LEGENDA: Densidade de fontes – relação com o número de fontes na área de influência de 500 m.

Dentre as 59 escolas abrangidas 15 estão instaladas na área de influência de indústrias no distrito Sede de Guarapuava. Em conformidade com o apresentado na FIGURA 9, relacionada as áreas verdes e praças, a situação mais crítica ocorre com os centros educacionais dentro da região de influência de no máximo duas fontes. Contudo, a FIGURA 10 ao considerar o público dos centros educacionais, enfoca o efeito direto sobre a saúde humana, principalmente jovens e crianças.

São dois centros educacionais que ficaram próximos à região de maior concentração de indústrias, especificamente dentro da área urbana, em sua porção sudoeste.

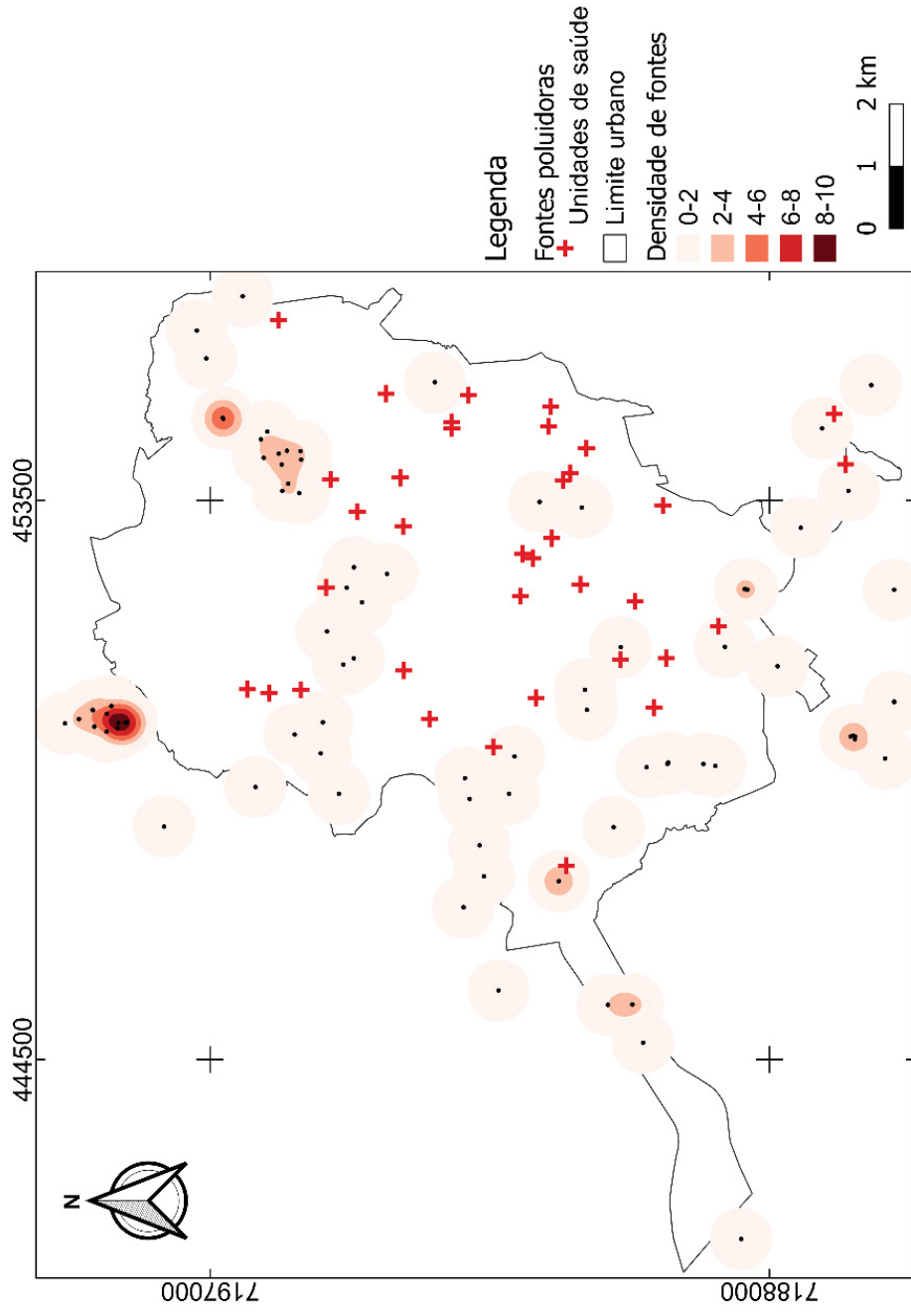
Alguns poluentes como o CO têm ação rápida e não exigem um tempo elevado de permanência e exposição do indivíduo para surtir efeito maléfico (LIU et al., 2018). A minimização deste tipo de impacto pode ocorrer com a preservação de maiores distâncias entre fontes poluentes e fontes sensíveis.

Na FIGURA 11 aparecem os centros de saúde, incluindo unidades básicas de saúde, hospitais e afins, e a sua disposição no município juntamente às fontes de poluição.

Pacientes internados e já fragilizados, que frequentem ou permaneçam nesses locais, podem estar mais susceptíveis aos riscos associados à poluição atmosférica. Conforme relatado por WHO (2016) e Andrade et al. (2017) os efeitos da poluição atmosférica são função, dentre outros fatores, da sensibilidade do indivíduo exposto.

Complementarmente, Bay et al. (2015) e Rafael et al. (2015) citaram a possibilidade de agravamento de doenças crônicas e câncer pela inalação de material particulado. Os impactos à saúde humana tendem a ser ampliados quando já se trata de pessoas doentes.

FIGURA 11 - MAPA DE CALOR POR DENSIDADE DE KERNEL CONSIDERANDO O ADENSAMENTO DE PONTOS DE POLUIÇÃO E UNIDADES DE SAÚDE NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).
LEGENDA: Densidade de fontes – relação com o número de fontes na área de influência de 500 m.

Ao todo são sete unidades de saúde, dentro do perímetro urbano, que se encontram na área de influência das fontes de emissões atmosféricas (FIGURA 11). Estas unidades estão sob a influência de até duas fontes de emissão na análise efetuada, e uma delas encontra-se no limite de influência de até quatro fontes, na porção sudoeste do perímetro urbano.

Ainda que haja menor número de unidades nas áreas de influência considerando o mapeamento efetuado (FIGURA 11) em comparação as áreas verdes e unidades educacionais, existe a possibilidade de que no caso das unidades de saúde, a situação seja ainda mais crítica.

A simulação do mapa de calor permite evidenciar os pontos potenciais de maior emissão de poluentes atmosféricos devido a uma maior concentração de fontes em uma região, ou seja, pontos considerados críticos. Mesmo não se tratando de um estudo de dispersão de poluentes, presume-se que populações próximas e o ambiente no entorno das fontes são os que estão pré-dispostos a maior risco de impactos ligados aos poluentes atmosféricos.

Contudo, há situações em que o elevado potencial poluidor de um empreendimento pode superar o grau de impacto de um aglomerado de fontes. Ou seja, nem sempre que houver uma maior concentração de fontes de emissão a região no entorno será a mais prejudicada, pois podem existir casos mais críticos com relação a indústrias que apresentem a carga poluidora de emissões mais elevada.

A interpretação da área de influência é variável dado o raio considerado no entorno de cada fonte. Quando duas ou mais regiões de influência se encontram ocorre um tipo de sobreposição dos riscos e efeitos da poluição.

Após uma análise detalhada da FIGURA 9, FIGURA 10 e FIGURA 11 e relacioná-las ao mapa de zoneamento (FIGURA 8) verifica-se que os adensamentos mais relevantes de indústrias ocorre nas ZI na porção ao norte da área urbana. A aglomeração situada em ZI, no entorno próximo da área urbana teve maior peso na interpolação, justamente em função da proximidade de um número significativo de indústrias, ou seja, 17 unidades.

Essa região (ZI) contemplou todas as classes estabelecidas com o fatiamento. Inclusive nas delimitações da área urbana houve um ponto de destaque em ZI, que atingiu até a 3ª classe previamente estipulada. Neste caso

o fator predominante foi a proximidade elevada entre apenas três unidades poluentes.

O fatiamento considerou cinco classes de densidade de fontes como observado nos mapas de calor. Nas delimitações da área urbana foram evidenciadas cinco regiões que se enquadraram na classe 2, ou seja, apresentando de duas a quatro indústrias cuja influência se sobrepõem no raio estabelecido para estudo (500 m).

No entorno próximo da área urbana ocorreram mais duas regiões nesta mesma classe. Já na classe 3, ou seja, com quatro a seis indústrias exercendo influência de maneira combinada, houve apenas uma região na área urbana e uma outra no entorno próximo. Quanto as classes 4 e 5, somente ocorreram no entorno da área urbana, em ZI.

Como se trata de área urbana, com intenso tráfego de veículos, deve-se lembrar a possibilidade de associação aos respectivos poluentes gerados, os quais não foram objeto deste estudo.

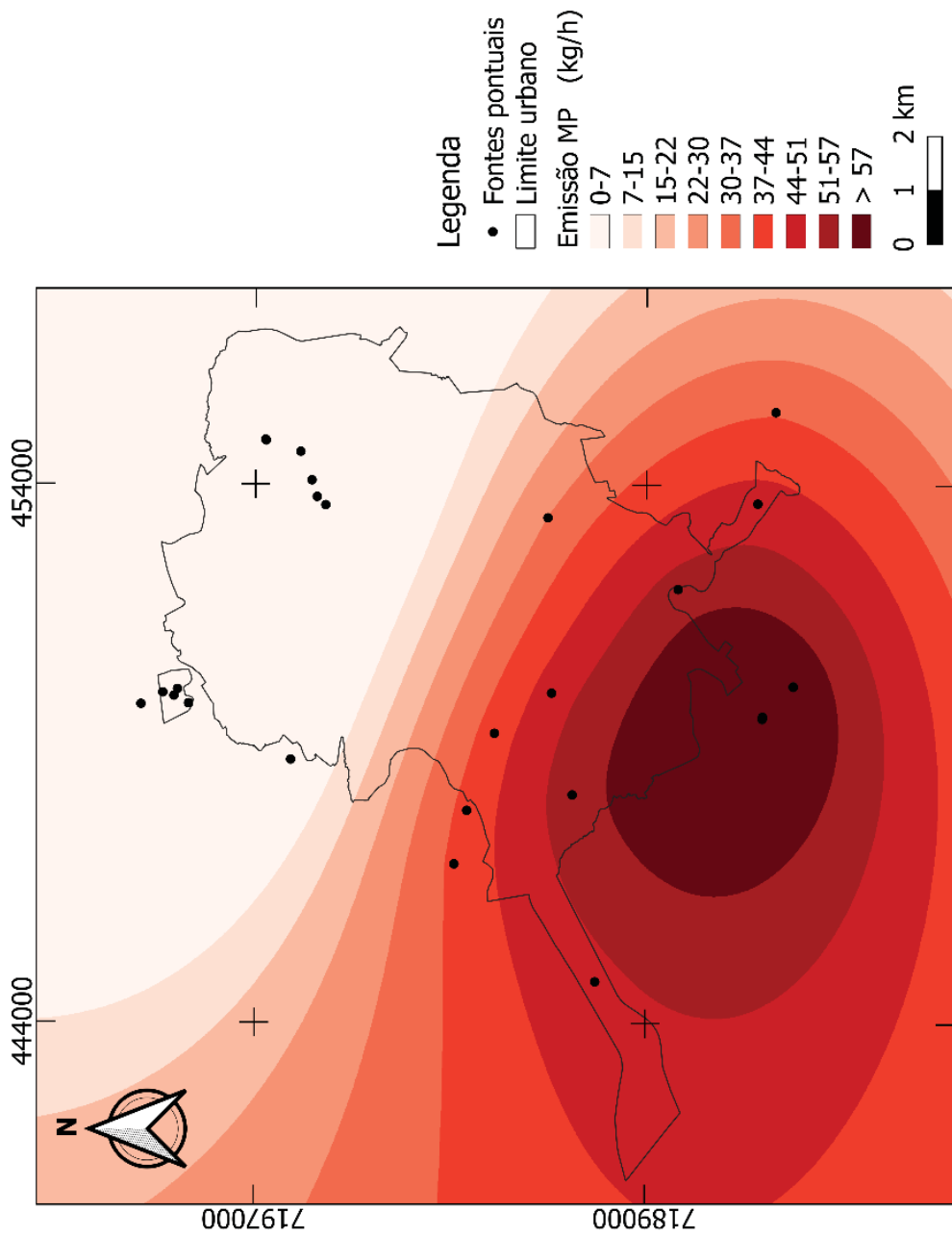
As informações obtidas em termos de adensamento de fontes foram também relacionadas com os níveis de estimativas de emissão obtidos pelo emprego de fatores do AP-42, utilizando o método geoestatístico de *Kriging*.

4.9 ANÁLISE DOS NÍVEIS DE POLUIÇÃO

Os mapas apresentados na FIGURA 12, FIGURA 13 e FIGURA 14 evidenciam o resultado da interpolação entre as estimativas de emissões das 46 fontes pontuais com a sua respectiva localização geográfica. O estabelecimento da condição de continuidade foi efetuado pela interpolação linear de *Kriging*.

Os resultados obtidos permitem relacionar e confrontar as informações de adensamento de fontes com cargas de emissão estimadas pelos fatores do AP-42. Os mapas apresentam ainda as regiões que estariam em condições mais críticas para cada um dos poluentes.

FIGURA 12 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE MATERIAL PARTICULADO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: Estimativa de emissão pelos fatores do AP-42. Direção predominante dos ventos: leste e nordeste.

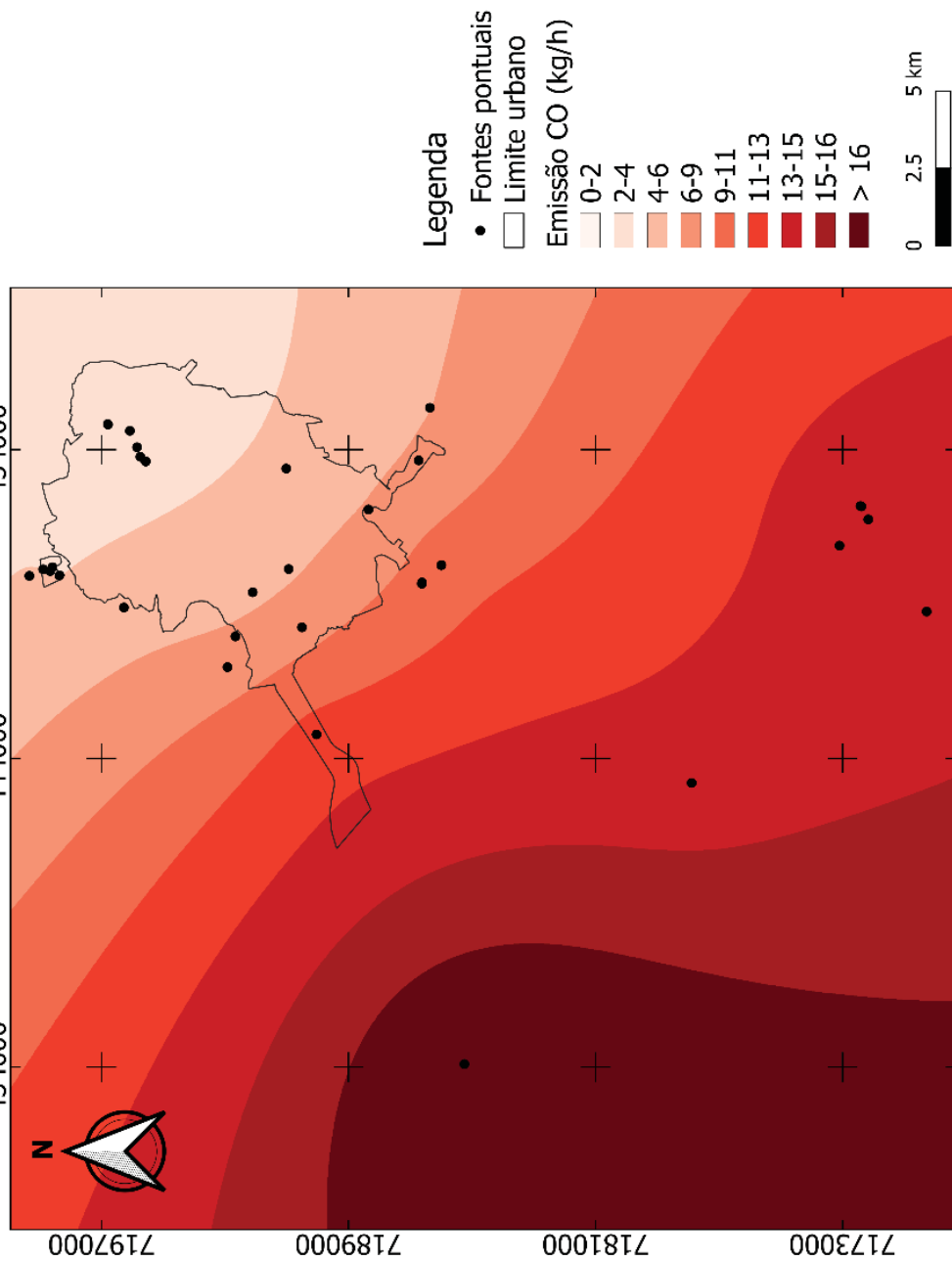
Em relação ao MP verifica-se que as maiores cargas ficaram concentradas na região sul e sudoeste da área urbana do município. A classe de cargas obtida acima de 57 kg MP/h estaria ligada a quatro fontes de usina de asfalto, que utilizam os combustíveis madeira, GLP, óleo diesel e óleo de xisto. A referida fonte que utiliza óleo de xisto foi a que apresentou a maior estimativa de emissão de MP.

Inseridas na região que representa a penúltima classe, 51 a 57 kg/h, aparece uma indústria de madeira e uma indústria química, ambas utilizando como combustível a madeira. Na classe referente ao intervalo de 44 a 51 kg/h as atividades relacionadas são: crematório (GLP), indústria alimentícia (madeira) e usina de asfalto (óleo de xisto), sendo esta a indústria com a segunda mais alta emissão de MP do estudo.

Vale ressaltar que ainda que em uma dada região ocorram fontes com reduzido potencial poluidor para determinado poluente, neste caso MP, podem haver empresas instaladas nas proximidades que aumentam significativamente os riscos para a região. Isto se justifica na região apontada pela presença das duas usinas de asfalto utilizando óleo de xisto mencionadas, já que para as demais indústrias listadas a carga estimada de MP encontra-se entre 0,02 e 1,74 Kg/h. As regiões ao norte da área urbana, onde ocorrem as maiores concentrações de fontes, apresentaram emissão menor que 7 kg MP/h.

Os resultados apresentados estão de acordo com o que foi evidenciado na discussão prévia efetuada acerca deste poluente, com destaque para o uso de óleo de xisto.

FIGURA 13 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE MONÓXIDO DE CARBONO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).
 LEGENDA: Estimativa de emissão pelos fatores do AP-42. Direção predominante dos ventos: leste e nordeste.

Quanto ao poluente monóxido de carbono as cargas estimadas mais elevadas, acima de 16 kg/h, estão relacionadas a uma fonte situada fora da área urbana, ou seja, uma indústria de papel e celulose.

Na classe que compreende cargas entre 13 e 15 kg/h estão situadas seis fontes, relacionadas à atividade de fabricação de cerveja, chopes e maltes, uma unidade de serviço de saúde, um abatedouro e uma atividade de armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos.

Os empreendimentos em questão utilizam a madeira como combustível, com exceção apenas de uma fonte de fabricação de cerveja, chopes e maltes que utiliza GLP. Isto evidencia, em concordância com a literatura, de que a maior emissão de CO está ligada ao consumo de madeira nos sistemas de combustão, portanto, por aspectos inerentes às condições de combustão e ao próprio combustível.

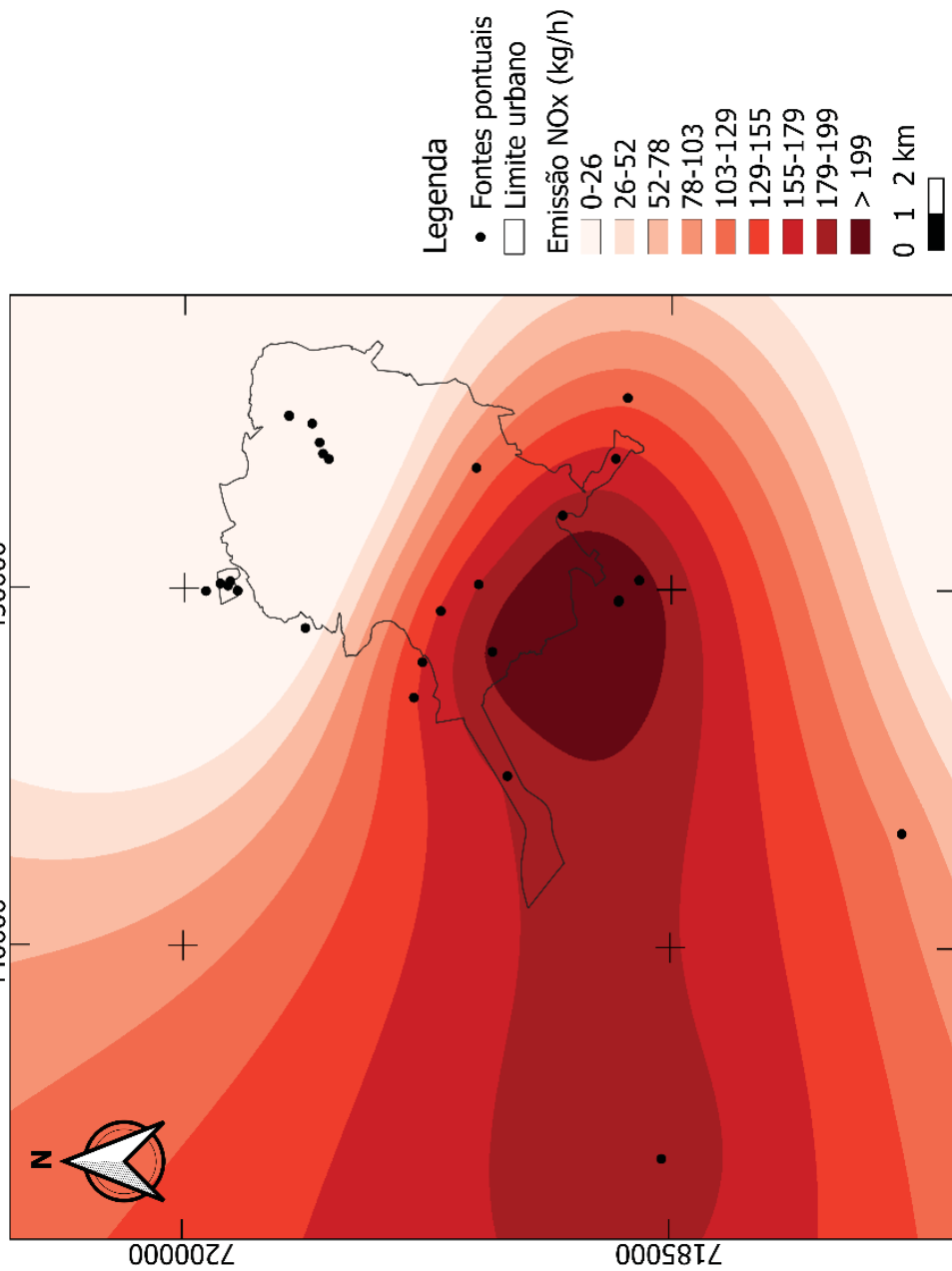
O fato dessas fontes estarem afastadas da área urbana possivelmente reduz os impactos associados à sua operação, já que a tendência é que não haja concentração de núcleos populacionais nas proximidades. A intensidade da carga de poluente CO apresentada pela interpolação tem maior relação com o potencial poluidor do que com o adensamento das fontes.

A indústria papeleira por sua vez teve sua carga estimada em 44,58 kg/h, valor este maior que o dobro da estimativa apontada para a atividade de armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos.

As fontes correspondentes a fabricação de cerveja, chopes e maltes, utilizando lenha como combustível tem valor intermediário quando comparado às atividades supracitadas, ou seja, cerca de 65% cada uma, em relação a carga esperada para a unidade mais crítica.

As demais fontes, relacionadas à serviço de saúde, fabricação de cerveja, chopes e maltes (com GLP) e abatedouro, apresentaram significativa discrepância em relação às três primeiras. Estas tiveram suas cargas estimadas no intervalo de 0,01 kg/h (serviço de saúde) a 3,62 kg/h (abatedouro). Em contrapartida na região de maior adensamento de indústrias, situada no perímetro urbano, as emissões restringem-se a taxas menores que 4 kg/h.

FIGURA 14 - MAPA DE KRIGAGEM DE CARGA DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO POR FONTES PONTUAIS NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA



FONTE: O autor (2020).
 LEGENDA: Estimativa de emissão pelos fatores do AP-42. Direção predominante dos ventos: leste e nordeste.

O mapa obtido pela Krigagem para o poluente NO_x apresentado na FIGURA 14 mostrou-se bastante similar ao apresentado para MP. Contudo, as faixas de valores relacionados são mais elevadas, de maneira que a maior classe indica valores superiores a 199 kg NO_x/h em contraponto a valores de MP maiores que 57 kg/h.

As atividades envolvidas pela classificação do maior nível de NO_x na FIGURA 14 são: quatro fontes de usinas de asfalto e uma de indústria de madeira, que utiliza madeira como combustível. Dentre as quatro primeiras fontes os combustíveis empregados são óleo de xisto, madeira, GLP e óleo diesel, em ordem decrescente do nível emissão associado. O uso do óleo de xisto neste caso está relacionado a uma estimativa de 469,47 kg NO_x/h , enquanto as outras quatro fontes estão associadas a cargas entre 0,14 e 2,05 kg/h.

Na segunda maior faixa de emissão estimada para NO_x estão compreendidas as seguintes unidades: uma indústria química, uma Indústria de papel e celulose, uma indústria alimentícia e uma usina de asfalto. Apenas a usina de asfalto utiliza óleo de xisto e as demais utilizam madeira. A unidade de asfalto apresentou emissão calculada de 343,94 kg NO_x/h . e a indústria papelreira com a emissão estimada de 36,46 kg NO_x/h , enquanto que dentre as demais fontes o valor mais elevado foi 0,87 kg/h, obtido para a indústria química.

Embora haja predominância no uso de derivados de madeira entre as indústrias no município, a discrepância evidenciada para as emissões de NO_x envolvendo o óleo de xisto, merece destaque, reforçando o elevado potencial poluidor deste combustível. Os resultados obtidos aqui concordam com inventário desenvolvido por Zhou et al. (2019) no qual os processos utilizando combustíveis fósseis foram também os mais representativos em termos de emissão de NO_x , e a combustão de biomassa dominou em termos de emissões de CO.

As indústrias mais concentradas e localizadas na área urbana ficaram em posição que as emissões estimadas de NO_x não ultrapassam 26 kg/h. Ainda que a maior concentração das fontes pontuais ocorra junto a região urbana do município e aos distritos (FIGURA 7), as áreas mais críticas estão, em sua maioria, fora do perímetro urbano, assim como ocorreu para CO e MP, o que ameniza potenciais impactos à saúde humana.

Em inventário elaborado por Hua et al. (2019), com exceção do poluente NH_3 , a maior concentração de poluentes ocorreu na região onde estavam localizadas indústrias pesadas, tráfego intenso e população altamente densa. Entretanto, cabe a consideração de que na estimativa efetuada neste trabalho não foi levado em consideração fontes fugitivas, móveis e aquelas pontuais não listadas nos processos de licenciamento em vigência.

Aqui vale destacar que a direção do vento predominante na região não foi considerada na confecção dos mapas, justamente por não se tratar de um estudo de dispersão de poluentes atmosféricos. Muito embora sabe-se que este fator pode diferenciar o grau de impacto sobre um aglomerado populacional dada a presença de fontes de poluição atmosférica.

A direção predominante dos ventos em Guarapuava é leste e nordeste (IAPAR, 2019). Desta maneira os receptores situados nesta direção estão sujeitos a maiores níveis de poluição. Ou seja, a direção dos ventos predominante no município, ocorre justamente favorecendo a dispersão das maiores cargas de poluentes evidenciadas no sentido contrário a área urbana do município. No entanto, se considerada a região de maior adensamento de fontes na área urbana, em zona industrial, as correntes de vento tendem a conduzir as plumas de poluição para o centro da área urbana. Assim sendo, um aumento do número de indústrias na atual zona industrial mais adensada requer um estudo mais amplo, com vistas a minimizar potenciais impactos.

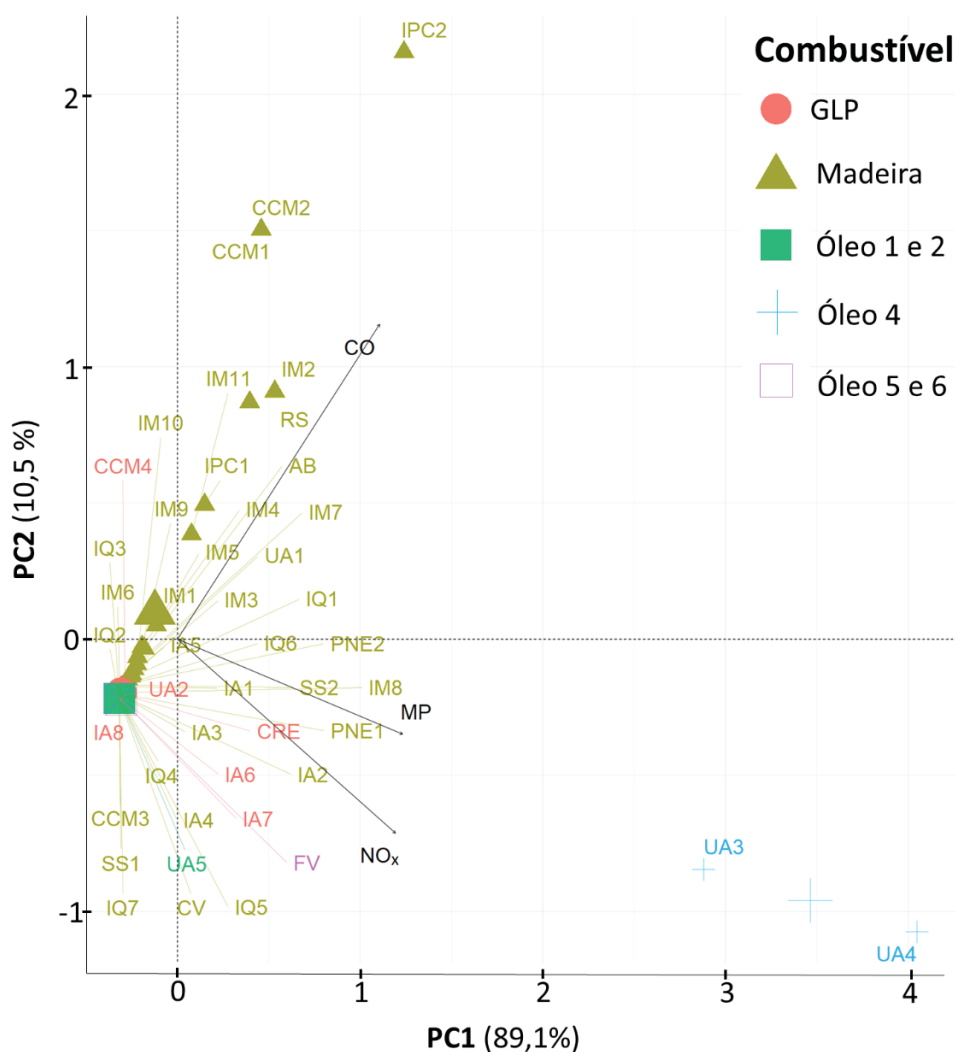
Como ferramenta de gestão ambiental, no Brasil, há estados que impõem padrões de emissão mais restritivos, considerando a localização da fonte ou a qualidade do ar no seu entorno (VERGNHANINI FILHO, 2016). Neste sentido a SEMA nº016/2014 trata a respeito de cuidados adicionais e medidas de precaução ou corretivas, com áreas saturadas e em vias de saturação da qualidade do ar (SEMA, 2014). No estado de São Paulo, por meio do decreto nº 50.753/2006, é imposto o controle de ocupação do solo em função das condições da qualidade do ar local em áreas saturadas e em vias de saturação.

As regiões delimitadas nos mapas com as maiores estimativas de emissões podem ser selecionadas como potenciais *hotspots* de emissão de poluentes e de sensibilidade aos riscos da poluição atmosférica, assim como considerado por Sindhwani et al. (2015).

Como forma de salientar a viabilidade disto merecem destaque os trabalhos de Qiu et al. (2014) e Santos et al. (2016) os quais apontaram que ao relacionar quantidade, de poluente e localização das emissões é possível o reconhecimento das emissões de poluentes mais críticas bem como o mecanismo da poluição do ar.

A análise multivariada ACP foi realizada neste trabalho com a intenção de explorar melhor os resultados obtidos para carga de emissão dos poluentes MP, CO e NO_x, estando estes relacionados às variáveis tipo de indústria e tipo de combustível empregado nos processos de combustão. O resultado é apresentado na FIGURA 15.

FIGURA 15 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) PARA CARGA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS (MP, CO E NO_x) POR FONTES PONTUAIS



FONTE: O autor (2020).

LEGENDA: UA - Usina de asfalto; SS - Serviço de Saúde; IPC - Indústria de papel e celulose; IM - Indústria da madeira; IA - Indústria alimentícia; CRE - Crematório; RS - Armazenamento,

tratamento e disposição final de resíduos; AB - Abatedouro; PNE - Fabricação e condicionamento de pneumático; CCM - Fabricação de cerveja, chopes e maltes; CV - Fabricação de carvão vegetal; FV - Fabricação de artefatos de fibra de vidro; IQ - Indústria química.

Na FIGURA 15 os eixos são variáveis latentes e estas são as principais componentes geradas pela análise. A partir destes novos eixos que levam em consideração a variância do universo amostral, ou seja, as fontes pontuais de poluição, pode-se observar a nova distribuição dos valores que relacionam a atividade, o combustível utilizado e a carga de emissão estimada para cada um dos poluentes (MP, CO e NO_x).

A variável latente 1 (PC1) e a variável latente 2 (PC2), explicam 89,1% e 10,5% da variação dos dados, respectivamente. O desvio padrão da componente 1 foi 1,62 e da componente 2 foi 0,55. Os autovalores obtidos foram: PC1 - 1,79 e PC2 - 0,81. Utilizando o critério de *Broken-Stick* para melhor visualização em plano cartesiano, duas componentes foram selecionadas, acumulando 99% da variação dos dados.

Um agrupamento coeso ocorreu para a maioria das fontes e em contrapartida as fontes que se distanciaram foram as seguintes:

- Usinas de asfalto 3 e 4 (UA3 e UA4);
- Indústria de papel e celulose 1 e 2 (IPC1 e IPC2);
- Fabricação de cerveja, chopes e maltes 1 e 2 (CCM1 e CCM2);
- Indústria da madeira 2 e 11 (IM2 e IM11);
- Unidade de armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos (RS). UA3, UA4 e IPC2;

São as unidades mais dispersas, ou seja, afastadas das demais unidades industriais, justamente por terem apresentado maior carga poluidora dos poluentes aos quais se aproximam na plotagem (FIGURA 15).

As fontes vinculadas a UA3 e UA4 apresentaram maior relação com as emissões de MP e NO_x utilizando óleo de xisto (óleo 4). Enquanto as outras sete fontes apresentaram maior relação com as emissões de CO, queimando madeira. Os agrupamentos formados, tanto o maior, com 37 unidades, quanto os menores, refletem o fato de as unidades terem apresentado estimativas de emissões semelhantes para os mesmos poluentes entre si.

Fica evidente que os resultados obtidos na Krigagem e na ACP concorrem no sentido das maiores cargas de poluição de CO estarem vinculadas a indústria de papel e celulose utilizando madeira, bem como para MP e NO_x, associado às usinas de asfalto empregando óleo de xisto na combustão. Quanto a emissão de CO também na Krigagem apareceram as atividades de fabricação de cerveja, chopes e maltes bem como a atividade de armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos atreladas a regiões com elevada carga esperada de CO.

Apareceram ainda na Krigagem fontes de CO de uma unidade de serviço de saúde e um abatedouro situados na mesma classe das fontes anteriores. Apesar disso, estas são fontes que não se destacam pela emissão de CO. Sua aparição na Krigagem é assim justificada, por nesta análise, ter sido considerado além das cargas de poluição a posição geográfica da fonte.

Diante do exposto deve ser colocado atenção no aspecto da importância em relacionar a variável espacial quando se trata de poluição atmosférica. Conforme apontado por Maliene et al. (2011), o atual processo de urbanização e crescimento pode ter seu planejamento e tomada de decisões apoiados em tecnologias inovadoras com base em SIG. As evidências, levantadas com o uso do SIG, podem contribuir para a minimização de impactos ambientais e assim, auxiliar na manutenção da sustentabilidade de ambientes urbanos e industriais.

4.10 FERRAMENTA PARA A GESTÃO AMBIENTAL

Até o final de 2019 o SGA, sistema vinculado ao licenciamento ambiental no estado do Paraná, não possuía relação direta com os dados de automonitoramento de emissões. O empreendedor apenas enviava seus relatórios de automonitoramento e os dados eram lançados no sistema pelos próprios técnicos do órgão ambiental. Somado a isto não existia uma organização e atualização de forma compilada das informações obtidas neste processo de declaração de emissões. Bem como dos dados inseridos diretamente pelo empreendedor na fase de solicitação ou renovação de licença ambiental. Com o funcionamento do sistema de declarações de automonitoramento (DEA) isto tende a mudar.

O inventário de fonte fixa traz informações inerentes às configurações operacionais, assim alterações que venham a ocorrer levam à desatualização do mesmo. Portanto, para mantê-lo atualizado é necessário à sua reelaboração periódica. Bang e Khue (2019) indicam que um inventário de emissões atmosféricas deve ser elaborado anualmente, ou no mínimo a cada cinco anos, com vistas a atualizar as condições de emissão, tendências das principais fontes e observar a eficácia de medidas de controle da qualidade do ar que tenham sido adotadas.

O inventário de emissões atmosféricas do estado, abrangendo o município de Guarapuava, teve seu relatório elaborado em 2013 (GRAUER, 2013), e até então não há atualizações publicadas. Neste inventário estadual Guarapuava dispunha de 134 fontes fixas monitoradas. A partir deste estudo foram evidenciadas 40 fontes no município, além daquelas contabilizadas no inventário estadual. No entanto este valor não consegue expressar se as fontes coincidem e se todas são monitoradas. É por este tipo de lacunas que a falta de continuidade nas avaliações compromete a sua aplicabilidade.

A realidade apresentada não permite o acompanhamento do crescimento de número de fontes e níveis de poluição nos diferentes municípios e regiões do estado. A proposição dos produtos finais deste trabalho como ferramenta para tomada de decisão em novos processos de licenciamento ambiental local vislumbra justamente suprir esta demanda, para o município de Guarapuava, podendo ser estendido e replicado para outras cidades do estado.

Diante dos resultados obtidos com o presente estudo verifica-se a viabilidade de propor a estimativa das emissões de MP, CO e NO_x bem como os mapas e análises elaborados como ferramentas de apoio à gestão ambiental e ao gerenciamento de risco. E para tanto, fornecer informações para tomadores de decisão, órgãos governamentais e sociedade civil.

A ideia é que todo município disponha de um inventário de fontes de emissões vinculado ao SGA do órgão ambiental competente, onde os dados de declaração de automonitoramento e de entrada do processo de licenciamento, sejam atualizados automaticamente. Em um primeiro momento onde não estiverem disponíveis dados de monitoramentos, existe, portanto, a possibilidade de uso de fatores de emissão. Como exemplo, tem-se aqueles disponibilizados pelo AP-42 e que foram empregados neste estudo.

Os produtos finais contemplando as estimativas de emissão, mapas e *shapefiles* obtidos serão disponibilizados para a SEMAG e Secretaria Municipal de Habitação e Urbanismo. Recomenda-se a utilização no que concerne decisões sobre a localização, instalação, ampliação e a operação de atividades potencialmente poluidoras, que justamente são incumbências do licenciamento ambiental por parte dos órgãos públicos (CONAMA, 1997). Cabe a estes atentar para a necessidade de atualização dos dados disponibilizados.

A aplicabilidade dos produtos obtidos traz uma evidência da concentração geográfica das fontes licenciadas e dos maiores níveis de poluição em potencial por local. Com a alimentação do sistema DEA as estimativas podem ser substituídas por dados reais de monitoramento.

Em caso do DEA e SGA limitarem a entrada de dados das fontes e dos monitoramentos, o armazenamento pode ocorrer em um sistema de coordenadas unificado, o que repercutiria em dados suficientemente precisos e passíveis de serem facilmente atualizados. A partir disto, a geração de inventários municipais e estadual tem condições de ser realizada com maior frequência e apresentar resultados de maior significância.

A entrada dos dados no DEA e SGA é efetuada pelo empreendedor. Como foi observado neste trabalho, existem lacunas de preenchimento dentro do SGA. Com vistas a aumentar a qualidade dos dados lançados, caberia uma breve explicação para cada variável solicitada no sistema e a delimitação clara das unidades de medida para cada parâmetro.

Seria interessante criar um vínculo entre os sistemas SGA e DEA, que permitisse a entrada de dados equivalentes aos utilizados neste estudo e a espacialização automática das fontes e níveis de poluição a partir de dados de monitoramento ou estimativas das emissões atmosféricas.

Guarapuava não possui rede de monitoramento de qualidade do ar, mas tem potencial para receber investimentos neste sentido graças ao desenvolvimento que tem apresentado. Tendo isto em vista, o mapeamento efetuado apresenta mais uma potencial aplicação, na definição de locais para um futuro monitoramento da qualidade do ar. Reforçando esta potencialidade Grauer (2013) apresenta que uma das maneiras para se determinar quais locais são prioritários para o monitoramento da qualidade do ar, é o inventário de fontes, o qual viabiliza a identificação de regiões com as maiores emissões.

Em análise de processos de licenciamento os técnicos dos órgãos ambientais podem ter à disposição uma ferramenta que permita e facilite os seguintes aspectos:

- Identificar a viabilidade locacional de novos empreendimentos evitando demasiada concentração em áreas saturadas ou em vias de saturação;
- Estabelecimento de condicionantes de padrões de emissão menos ou mais restritivos, em função de menor ou maior carga poluidora por região;
- Cumprimento de condicionantes relacionados ao monitoramento de emissões atmosféricas;
- Acompanhamento das medidas propostas com relação às áreas saturadas e em vias de saturação.

Desta maneira as potenciais aplicações são não apenas no sentido de limitar a localização de novos empreendimentos ou impor padrões de emissão mais restritivos. Porém, exigir a implementação de melhores tecnologias de controle de emissão e incentivar programas de medidas para controle de forma conjunta pelos usuários próximos e possivelmente envolvendo o órgão ambiental.

Gao et al. (2019) evidenciaram que a distribuição desigual de produtividade, somada à falta de autodisciplina da indústria podem provocar a insustentabilidade de recursos, e consequentes emissões de poluentes centralizadas.

A renovação de tecnologias de controle de poluição, substituição de combustível, ou a realocação da indústria das áreas urbanas para lugares afastados, onde existe capacidade ambiental suficiente, pode ser eficiente no sentido de reduzir significativamente a poluição do ar urbano. Yang et al. (2018) esclarecem que no âmbito industrial direcionar ações de mitigação de emissões apenas em fim de tubo nem sempre é eficaz.

De acordo, para Qiu et al. (2014) o inventário de emissões de poluentes atmosféricos pode contribuir na previsão da qualidade do ar. Atabi et al. (2016) complementam em afirmar que estimar poluentes do ar em áreas industriais permite a interpretação e direcionamento em decisões voltadas a programas de gerenciamento da qualidade do ar.

Os tomadores de decisão e responsáveis pela liberação de licenças ambientais para empreendimentos terão a possibilidade de tomar decisões mais informadas e fundamentadas, o que inclusive pode lhes conferir maior segurança nestes atos.

5. CONCLUSÃO

Após análise de 174 fontes pontuais e fugitivas de poluentes atmosféricos chegou-se as conclusões apresentadas a seguir. A estimativa de emissões de MP, CO e NO_x, empregando os fatores do AP-42, foi efetuada para 46 fontes pontuais com combustão. Os resultados apontaram cargas de CO de 298,36 kg/h, para NO_x 989,93 kg/h e para MP 243,07 kg/h.

Combustíveis derivados de madeira são os mais utilizados e estão vinculados a maior emissão de CO (70,2%), dentre os poluentes investigados. Os maiores níveis de emissão de MP (60,5%) e NO_x (82,2%) foram relacionados ao consumo de óleo de xisto, indicando o elevado potencial poluidor deste combustível. As usinas de asfalto apresentaram os maiores índices de emissão para MP e NO_x, em contrapartida a indústria de papel e celulose o maior nível de emissão de CO.

O maior adensamento das fontes pontuais ocorre junto a região urbana do município e aos distritos, contudo, as áreas mais críticas previstas em termos de emissão de poluentes, estão fora do perímetro urbano. Porém, considerando-se o potencial de expansão do município, seria interessante a seleção de *hotspots* de emissão de poluentes e de sensibilidade à poluição atmosférica.

O elevado potencial poluidor de um empreendimento pode superar o grau de impacto de um aglomerado de fontes. Ainda que em uma dada região ocorram fontes com reduzido potencial poluidor a presença de empresas específicas no entorno pode aumentar significativamente os riscos. Neste contexto, oposições entre os resultados da ACP e dos mapas elaborados pelo método geoestatístico de *Kriging* chamam a atenção para a importância de se considerar a variável espacial quando se trata de poluição atmosférica.

A análise espacial das fontes de emissão e das condições de uso e ocupação do solo em ambiente SIG, permitiu reconhecer que alguns receptores, considerados de maior sensibilidade, estão sob influência relevante de fontes de emissão, em raios de 500m, na área urbana e em seu entorno. Outra característica evidenciada é que a direção dos ventos no município pode favorecer a dispersão das maiores concentrações de poluentes encontradas, no sentido contrário a área urbana do município. Entretanto, as plumas de poluição

formadas em zona industrial urbana podem ser direcionadas para as regiões de maior adensamento populacional.

A melhoria futura e a atualização contínua deste inventário de emissões desenvolvido devem se concentrar no aprimoramento e refinamento dos dados das atividades que não constavam nos processos de licenciamento e na inclusão de outras fontes de poluição não contempladas, como as naturais e móveis.

Embora o inventário de emissões desenvolvido e a distribuição espacial das fontes possam apresentar incertezas, estes permitem uma melhor compreensão e análise das características da poluição atmosférica industrial no município destaque. Por conseguinte, podem ainda fornecer dados de entrada indispensáveis para a promulgação e implementação de estratégias de gestão voltadas à minimização de emissões atmosféricas e a precaução da concentração demasiada de fontes e seus impactos ambientais.

A consideração de dados como estes nas análises de licenciamento e gestão ambiental permitirá decisões e estabelecimento de condicionantes de operação para as indústrias voltadas a práticas de controle ambiental mais eficazes. O benefício se estende para órgãos de gestão e comunidade do entorno.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução nº 18, de 2 de setembro de 2004.

ANP. Resolução nº 3, de 27 de janeiro de 2016.

ALMARRI, M.; MA, X.; SONG, C. Selective adsorption for removal of nitrogen compounds from liquid hydrocarbon streams over carbon- and alumina-based adsorbents. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 48, n. 2, p.951-960. 2009. <https://doi.org/10.1021/ie801010w>

AL-THANI, H.; KOÇ, M.; ISAIFAN, R. J. A review on the direct effect of particulate atmospheric pollution on materials and its mitigation for sustainable cities and societies. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, p. 25, 27839-2785. 2018. DOI:10.1007/s11356-018-2952-8

AMARAL, S. S.; CARVALHO JR., J.A.; COSTA, M. A. M.; PINHEIRO, C. Particulate Matter Emission Factors for Biomass Combustion. *Atmosphere*, v. 7, n. 141, 2016. DOI:10.3390/atmos7110141.

AMORIN, R.; BRONI-BEDIAKO, E.; WORÇANYO, D.; KONADU, S. A. The Use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) as a Fuel for Commercial Vehicles in Ghana: A Case Study at Tema Community 1. *Current Journal of Applied Science and Technology*, v. 9, n. 2, 2018.

ANDRADE, M. F.; KUMAR, P.; FREITAS, E. D.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, J.; MARTINS, L. D.; NOGUEIRA, T.; MARTINEZ, P. P.; MIRANDA, R. M.; ALBUQUERQUE, T.; GONÇALVES, F.L.T.; OYAMA, B.; ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment*, v. 159, p. 66-82, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D396-19a: Standard Specification for Fuel Oils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AUSTRALIAN DEPARTMENT OF AGRICULTURE, WATER AND THE ENVIRONMENT. National Pollutant Inventory (NPI) 2019. Disponível em: <<http://www.npi.gov.au/>>. Acesso em: 05 jul. 2020.

ATABI, F.; JAFARIGOL, F.; MOATTAR, F.; NOURI, J. Comparison of AERMOD and CALPUFF models for simulating SO₂ concentrations in a gas refinery. *Environ Monit Assess*, v. 188, n. 9, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5508-8>

BANG, H. Q.; KHUE, V. H. N. Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles. *Air Emission Inventory*. Cap 1. IntechOpen. 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79928>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

BARBON, A.; GOMES, J. Simulação de emissões atmosféricas sobre Araucária. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.15, n.2. Abr/Jun, 2010. p. 129-140.

BATTERMAN, S.; GANGULY, R.; HARBIN, P. High Resolution Spatial and Temporal Mapping of Traffic-Related Air Pollutants. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2015, v. 12, 3646-3666. DOI:10.3390/ijerph120403646.

BAI, Y.; BRUGHA, R.E.; JACOBS, L.; GRIGG, J.; NAWROT, T.S.; NEMERY, B. Carbon loading in airway macrophages as a biomarker for individual exposure to particulate matter air pollution-A critical review. *Environ. Int.* v. 74C, p.32-41, 2015.

BERNARD, C. *Lecons sur les Effects des Substances Toxiques et Medicamenteuses*. Balliere, Paris, 1857.

BRANCO, S. M.; MURGEL, E. *Poluição do ar*. 2. ed. Moderna: São Paulo, 2004. 112 p.

BRAVO, M. A.; SON, J.; FREITAS, C. U.; GOUVEIA, N.; BELL, M. L. Air pollution and mortality in São Paulo, Brazil: Effects of multiple pollutants and analysis of susceptible populations. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, p. 1–12, 2015.

BRASIL. Lei complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011.

BRUNSKILL, E.; ROY, N. SLAM using Incremental Probabilistic PCA and Dimensionality Reduction. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005. DOI:10.1109/robot.2005.1570142.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. 2015. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

CADASTRO NACIONAL DE UIDADES DE CONSERVAÇÃO (CNUC). Download de dados geográficos: Áreas especiais – Unidades de conservação. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

CERQUEIRA, J. S.; ALBUQUERQUE, H. N.; SOUSA, F. A. S. Atmospheric pollutants: modeling with Aermოდ software. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>.

CHANG, Z.; CHU, M.; ZHANG, C.; BAI, S.; LIN, H.; MA, L. Influence of inherent mineral matrix on the product yield and characterization from Huadian oil shale pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 130, p. 269–276. 2018. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.12.022

CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N.; ELLERBUSCH, F. *Biomass: applications, technology, and production*. United States, 1980.

COELHO, S. T.; SANCHES-PEREIRA, A.; TUDESCHINI, L. G.; GOLDEMBERG, J. The energy transition history of fuelwood replacement for liquefied petroleum

gas in Brazilian households from 1920 to 2016. *Energy Policy*, v. 123, p. 41–52. 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.041.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Manual de Produtos Químicos da CETESB. 2016. Disponível em: <<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/Ficha>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

CONSELHO DO PLANO DIRETOR DE GUARAPUAVA (CONCIDADE/Guarapuava). Mapas (.dwg) do Caderno Temático Plano Diretor 2016/2026. 2017.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (CEMA). Resolução nº 70, de 2009. Dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e critérios e dá outras providências, para Empreendimentos Industriais.

CEMA. Resolução nº 88, de 2013. Estabelece critérios, procedimentos e tipologias para o licenciamento ambiental municipal de atividades, obras e empreendimentos que causem ou possam causar impacto de âmbito local e determina outras providências.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997.

CONAMA. Resolução do nº 5, de 15 de junho de 1989.

CONAMA. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006.

CONAMA. Resolução nº 436, de 26 de dezembro de 2011.

CONAMA. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018.

COTROZZI, L.; TOWNSEND, P. A.; PELLEGRINI, E.; NALI, C.; COUTURE, J. J. Reflectance spectroscopy: a novel approach to better understand and monitor the impact of air pollution on Mediterranean plants. *Environmental Science and Pollution Research*, v.25, n.9, p.8249–8267. 2017. DOI:10.1007/s11356-017-9568-2.

DAPPER, S. N.; SPOHR, D.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. *Estudos avançados*, v. 30, n. 86, 2016.

DE FUSCO, L.; JEANMART, H.; BLONDEAU, J. A modelling approach for the assessment of an air-dryer economic feasibility for small-scale biomass steam boilers. *Fuel Processing Technology*, v. 134, p. 251-258, 2015.

DENG, C.; XIE, H.; YE, X.; ZHANG, Z.; LIU, M.; TONG, Y.; OU, L.; YUAN, W.; ZHANG, W.; WANG, X. Mercury risk assessment combining internal and external exposure methods for a population living near a municipal solid waste incinerator. *Environmental Pollution*, v. 219, 2016. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.09.006

DONG, X.; ZHAO, X.; PENG, F.; WANG, D. Population based Air Pollution Exposure and its influence factors by Integrating Air Dispersion Modeling with

GIS Spatial Analysis. Scientific Reports, v.10, n.1. 2020. DOI:10.1038/s41598-019-57385-9.

DRISCOLL, T. A.; FRIEDMAN, B. Improving EPA's Emissions Factors Program. 2010. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/driscoll.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

EL-EMAM, M. A.; DONG, S. W.; ZHOU, L. CFD-DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter. Advanced Powder Technology, v. 30, n. 11, p. 2686-2702. 2019. DOI: 10.1016/j.appt.2019.08.015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 26 fev. 2020.

EPE. Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). EMEP/EEA air pollutant emission inventory. Guidebook, 2019.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ (FIEP). Cadastro Industrial: Base FIEP 2017. Curitiba, 2017.

FIEP. Panorama Industrial do Paraná 2016. Curitiba, 2016.

FUSARO, L.; SALVATORI, E.; MEREU, S.; SILLI, V.; BERNARDINI, A.; TINELLI, A.; MANES, F. Researches in Castelporziano test site: ecophysiological studies on Mediterranean vegetation in a changing environment. Rendiconti Lincei, v. 26, n.S3, p.473-481. 2015. DOI:10.1007/s12210-014-0374-1.

GAO, C.; GAO, W.; SONG, K.; NA, H.; TIAN, F.; ZHANG, S. Spatial and temporal dynamics of air-pollutant emission inventory of steel industry in China: A bottom-up approach. Resources, Conservation & Recycling, v. 143, p. 184-200, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.032>.

GAO, S.; FANG, S.; SONG, R.; CHEN, X.; YU, G. Extractive Denitrogenation of Shale Oil Using Imidazolium Ionic Liquids. Green Energy & Environment. v.5, p.173-182. 2020. DOI: 10.1016/j.gee.2020.04.002

GARBARAS, A.; MASALAITE, A.; GARBARIENE, I.; CEBURNIS, D.; KRUGLY, E.; REMEIKIS, V.; PUIDA, E.; KVIETKUS, K.; MARTUZEVICIUS, D. Stable carbon fractionation in size-segregated aerosol particles produced by controlled biomass burning. J. Aerosol Sci. v. 79, p. 86-96, 2015.

GAVINIER, S.; NASCIMENTO, C. F. L. Poluentes atmosféricos e internações por acidente vascular encefálico. Ambiente & Água, Taubaté, v.9, n.3, 2014.

GENTILESCA, T.; RITA, A.; BRUNETTI, M.; GIAMMARCHI, F.; LEONARDI, S.; MAGNANI, F.; NOIJE, T. V.; TONON, G.; BORGHETTI, M. Nitrogen deposition

outweighs climatic variability in driving annual growth rate of canopy beech trees: Evidence from long-term growth reconstruction across a geographic gradient. *Global Change Biology*, v. 24, n. 7, p. 2898–2912. 2018. DOI:10.1111/gcb.14142.

GEORGIOPOULOU, M.; LYBERATOS, G. Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A case study. *Journal of Environmental Management* XXX. p. 1-11. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.017>.

GIODA, A. Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. *Quim. Nova*, v. 41, n. 8, p. 839-848, 2018. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170260>.

GRAUER, A. Inventário Estadual de Emissões Atmosféricas de Poluentes MP, CO, NO_x e SO_x e proposta para revisão e ampliação da rede de monitoramento da qualidade do ar do estado do Paraná. Curitiba: IAP, 2013. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Monitoramento/INVENTARIO/INVENTARIO_ESTADUAL_DE_EMITSOES_ATM_versaofinal.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2020.

GUARAPUAVA. Sobre Guarapuava. Disponível em: <<http://www.guarapuava.pr.gov.br>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

GUO, H.; LYON, R. E.; SAFRONAVA, N.; WALTERS, R. N.; CROWLEY, S. A simplified model on carbon monoxide yield in burning of polymeric solids containing flame retardants. *Fuel*, v. 222, p. 175-179. 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.101.

GUPTA A., GUPTA G. S. Role of air samplers for monitoring of ambient air quality. *IJART*. v. 1, n. 1, p. 51-59, 2016.

HASSLER, B.; MCDONALD, B. C.; FROST, G. J.; BORBON, A.; CARSLAW, D. C.; CIVEROLO, K.; GRANIER, C.; MONKS, P. S.; MONKS, S.; PARRISH, D. D.; POLLACK, I. B.; ROSENLOF, K. H.; RYERSON, T. B.; SCHNEIDEMESSER, E.; TRAINER, M. Analysis of long-term observations of NO_x and CO in megacities and application to constraining emissions inventories. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 18, p. 9920–9930. 2016.

HEIN, K. R. G.; BEMTGEN, J. M. EU clean coal technology - co-combustion of coal and biomass. *Fuel Processing Technology*. v.54, p.159-169. 1998.

HUA, H.; JIANG, S.; SHENG, H.; ZHANG, Y.; LIU, X.; ZHANG, L.; YUAN, Z.; CHEN, T. A high spatial-temporal resolution emission inventory of multi-type air pollutants for Wuxi city. *Journal of Cleaner Production*, v. 229, p. 278–288. 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.011.

IANNIELLO, R.; DI BLASIO, G.; MARIALTO, R.; BEATRICE, C.; CARDONE, M. Assessment of Direct Injected Liquefied Petroleum Gas-Diesel Blends for Ultra-Low Soot Combustion Engine Application. *Applied Sciences*, v. 10, n. 14, 4949. 2020. DOI:10.3390/app10144949

INDUMATI, S.; OZA, R. B.; MAYYA, Y. S.; PURANIK, V. D.; KUSHWAHA, H. S. Dispersion of pollutants over land–water–land interface: Study using CALPUFF model. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 473-478. 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). Médias históricas em estações do IAPAR: Guarapuava - 1976/2019. 2019. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). Avanços no Sistema de Gestão Ambiental facilitam a vida do cidadão: Emissões atmosféricas. 2019. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/2019/12/1606/Avancos-no-Sistema-de-Gestao-Ambiental-facilitam-a-vida-do-cidadao.html>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

IAT. Consulta às licenças ambientais pelo IAP (vigentes). Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1081>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

IAT. Guarapuava é o primeiro município a conceder licenciamento ambiental. 2015. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=682>>. Acesso em: 08 set. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e Estados: Censo Demográfico Guarapuava-PR. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/guarapuava/panorama>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

IBGE. Comissão nacional de classificação: CNAE-Subclasses 2.3. Disponível em: <<https://cnae.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 24 fev. 2020.

IBGE. Estatísticas econômicas: Indústria e Construção, 2020. Acesso em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria.html>>. Acesso em: 24 fev. 2020.

IBGE. Pesquisa Industrial Anual - Empresa - PIA-Empresa: Séries históricas 2017a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9042-pesquisa-industrial-anual.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

IBGE. Produto interno bruto dos municípios, 2017b. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/guarapuava/pesquisa/38/47001?tipo=ranking&indicador=47007&ano=2017>>. Acesso em: 25 fev. 2020.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. 1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. 2014. Disponível em: <http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Versao_Final_Std.pdf> Acesso em: 25 jan. 2020.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ (ITCG). Dados geoespaciais de referência: Divisão Político-Administrativa do Paraná. 2019. Disponível em:

<<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=8#>>. Acesso em: 15 nov.2019.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). Caderno estatístico Município de Guarapuava. 2020. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85000&btOk=ok>>. Acesso em: 25 fev. 2020.

JACKSON, D. A. Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology*, v. 74, p. 2204–2214. 1993.

JIANG, N.; YIN, S.; GUO, Y.; LI, J.; KANG, P.; ZHANG, R.; TANG, X. Characteristics of mass concentration, chemical composition, source apportionment of PM 2.5 and PM 10 and health risk assessment in the emerging megacity in China. *Atmospheric Pollution Research*, v. 9, n. 2, p. 309–321. 2017. doi:10.1016/j.apr.2017.07.005

JIE, L.; BO, M. Removal of Nitrogen Compounds from Shale Diesel Fraction Using Ionic Liquid [C4mim]HSO₄. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, v. 18, n. 3, p.15-21. 2016.

KIM, H.; KASIPANDI, S.; KIM, J.; KANG, S.; KIM, J.; RYU, J.; BAE, J. Current Catalyst Technology of Selective Catalytic Reduction (SCR) for NO_x Removal in South Korea. *Catalysts*, v. 10, n. 1, 52. 2020. DOI: 10.3390/catal10010052.

KINOSHITA, H.; TÜRKAN, H.; VUCINIC, S.; NAQVI, S.; BEDAIR, R.; REZAEI, R.; TSATSAKIS, A. Carbon monoxide poisoning. *Toxicology Reports*, v. 7, pg. 169-173. 2020. DOI: 10.1016/j.toxrep.2020.01.005.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, v. 52, p.119-139, 1951.

KUMAR, A.; YADAV, I. C.; SHUKLA, A.; DEVI, N. L. Seasonal variation of PM_{2.5} in the central Indo-Gangetic Plain (Patna) of India: chemical characterization and source assessment. *SN Applied Sciences*, v. 2, n. 8. 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-3160-y.

KUZMICHEV A.A.; LOBOYKO V.F. Impact of the polluted air on the appearance of buildings and architectural monuments in the area of town planning. *Procedia Engineering*. v. 150, p. 2095–2101, 2016.

KUZMICHEV A.A.; AZAROV V.N.; STEFANENKO I.V. The impact of dust particles on cultural heritage objects in the field of environmental mechanics. *Applied Mechanics and Materials*. v. 878, p. 259–262, 2018.

LEFOHN, A. S.; MALLEY, C. S.; SMITH, L.; WELLS, B.; HAZUCHA, M.; SIMON, H.; NAIK, V.;...; GEROSA, G. Tropospheric ozone assessment report: global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research *Elementa Sci. Anthropocene*. v.6, p. 28. 2018. DOI: 10.1525/elementa.279.

LEI, S.; HOU, Y.; WANG, X.; LIU, K. Unit Commitment Incorporating Spatial Distribution Control of Air Pollutant Dispersion. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v.13, n.3, p. 995-1005. 2016. DOI:10.1109/tii.2016.2631572.

LI, P.; FENG, Z.; CATALAYUD, V.; YUAN, X.; XU, Y.; PAOLETTI, E. A meta-analysis on growth, physiological, and biochemical responses of woody species to ground-level ozone highlights the role of plant functional types. *Plant, Cell & Environment*. v. 40, n.10, p. 2369–2380. 2017. DOI:10.1111/pce.13043.

LIU, H.; TIAN, Y.; XIANG, X.; LI, M.; WU, Y.; CAO, Y.; JUAN, J.; SONG, J.; WU, T.; HU, Y. Association of short-term exposure to ambient carbon monoxide with hospital admissions in China. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1. 2018. DOI:10.1038/s41598-018-31434-1.

LUO, X.; GUO, Q.; ZHANG, D.; ZHOU, H.; YANG, Q. Simulation, exergy analysis and optimization of a shale oil hydrogenation process for clean fuels production. *Applied Thermal Engineering*, v. 140, p. 102-111. 2018. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.012.

MALIENE, V.; GRIGONIS, V.; PALEVIČIUS, V. e GRIFFITHS, S. Geographic information system: Old principles with new capabilities. *URBAN DESIGN International*, 2011. v. 16, n. 1, 1–6. DOI:10.1057/udi.2010.25.

MARTINS, L. D.; WIKUATS, C. F. H.; CAPUCIM, M. N.; ALMEIDA, D. S.; COSTA, S. C.; ALBUQUERQUE, T.; CARVALHO, V. S. B.; FREITAS, E. D.; ANDRADE, M. F.; MARTINS, J. A. Extreme value analysis of air pollution data and their comparison between two large urban regions of South America. *Weather and Climate Extremes*, p. 1–11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.10.004>.

MESQUITA, H. C. Xisto betuminoso. *Revista de Administração Pública*. v.12, n.4, p. 97-119. Rio de Janeiro, 1978.

METEKU, B. E.; ANKUDEY, E. G.; OCRAN, G. A. Liquefied Petroleum Gas (LPG) transportation and storage in Ghana: The safety perspective. *Asian Journal of Science and Technology*, v. 10, p.9598-9601. 2019.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MET). *Relação Anual de Informações Sociais*, 2018.

MORAES, N. O. Modelagem dos Processos Físico-químicos e Atmosféricos Envolvidos na Formação de Oxidantes Fotoquímicos em Megacidades – O Caso da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2017. 234 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Doutorado no Programa de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. Atlas climático do estado do Paraná. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), 2019. 210 p.

NOBLE, A.; PALMER, S. M.; GLAVES, D. J.; CROWLE, A.; BROWN, L. E.; HOLDEN, J. Prescribed burning, atmospheric pollution and grazing effects on peatland vegetation composition. *Journal of Applied Ecology*. v. 55, n. 2, p. 559–569. 2017. DOI:10.1111/1365-2664.12994.

OCHOA-HUESO, R.; MUNZI, S.; ALONSO, R.; ARRÓNIZ-CRESPO, M.; AVILA, A.; BERMEJO, V.; ... THEOBALD, M. R. Ecological impacts of atmospheric pollution and interactions with climate change in terrestrial ecosystems of the Mediterranean Basin: Current research and future directions. *Environmental Pollution*, v.227, p.194–206. 2017. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.062.

O'HARA, M. T.; WATSON, R. T.; KAVAN, C. B. Managing the three Levels of Change. *Information Systems Management*, v. 16, n. 3, p.63-70. 1999. DOI:10.1201/1078/43197.16.3.19990601/31317.

OMINE, N., NAGAYASU, T., ISHIZAKA, H., MIYAKE, K., ORITA, K., KAGAWA, S. AQCS (Air Quality Control System) for thermal power plants capable of responding to wide range of coal properties and regulations. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, v. 54, n. 3. 2017.

ÖZDEN, Ö.; DÖĞEROĞLU, T.; KARA, S. Assessment of ambient air quality in Eskişehir, Turkey. *Environment International*. 34, p. 678–687, 2008.

PANWAR, V.; PRASAD, B.; WASEWAR, K. L. Biomass Residue Briquetting and Characterization. *Journal of energy engineering*. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000040.

PARANÁ. Lei nº 13.806, de 30 de setembro de 2002. Dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, conforme especifica e adota outras providências.

PARZEN, E. On estimation of a probability density function and mode. *Annals of Mathematical and Statistics*, v.33, p.1065-1076, 1962.

PATRA, A. K.; GAUTAM, S.; KUMAR, P. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation-A review. *Environmental Technology & Innovation*, v. 5, p. 233–249, 2016

PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *Philosophical Magazine, Series 6*, v. 2, n. 11, p. 559-572, 1901.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Manual de Engenharia Química*. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

PETROBRÁS. FISPQ: Óleo de xisto OTE. 2019. Disponível: <<http://www.br.com.br/wcm/connect/c70d4430-d26b-4939-8a0b-fa583e71f127/fispq-oleocomb-oleo-xisto-ote.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IZfFI-H&CVID=IZfFI-H>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PETROBRÁS. Gás Liquefeito de Petróleo: Informações técnicas, 2019a. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/man>

ual-tecnico-gas-liquefeito-petrobras-assistencia-tecnica-petrobras.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2020.

PETROBRÁS. Óleo combustível: Informações técnicas, 2019b. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/public/downloads/manual-tecnico-oleo-combustivel-assistencia-tecnica-petrobras.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

PETROBRAS. Unidade de Industrialização do Xisto (SIX). 2020. Disponível: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/unidade-de-industrializacao-do-xisto-six.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PRADO, G. H. C.; RAO, Y.; KLERK, A. Nitrogen Removal from Oil: A Review. *Energy Fuels* v. 31, p.14–36. 2017. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02779

PUTAUD, J.P.; VAN DINGENEN, R.; ALASTUEY, A.; BAUER, H.; BIRMILI, W.; CYRYS, J.; FLENTJE, H.; FUZZI, S.;...RAES, F. A European aerosol phenomenology- 3: physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmos. Environ.* v. 44, p. 1308-1320. 2010.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. 3.4 Madeira Version, 2019.

QIU, P.; TIAN H.; ZHU, C.; LIU, K.; GAO, J.; ZHOU, J. An elaborate high resolution emission inventory of primary air pollutants for the Central Plain Urban Agglomeration of China. *Atmospheric Environment*, v.86, p 93-101, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.062>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020.

RAFAEL, S.; TARELHO, L.; MONTEIRO, A.; SÁ, E.; MIRANDA, A.I.; BORREGO, C.; LOPES, M. Impact of forest biomass residues to the energy supply chain on regional air quality. *Sci. Total Environ.* v. 505C, p. 640-648, 2015.

RECEITA FEDERAL. Emissão de Comprovante de Inscrição e de Situação Cadastral, 2020. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/PessoaJuridica/CNPJ/cnpjreva/Cnpjreva_Solicitacao.asp>. Acesso em: 20 fev. 2020.

REN, X.; SUN, R.; MENG, X.; VOROBIEV, N.; SCHIEMANN, M.; LEVENDIS, Y. A. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*, v. 188, p. 310-323, 2017. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.10.017.

ROSENBLATT, M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *Annals of Mathematical and Statistics*, v.27, p.832-837, 1956.

RUSHINGABIGWI, G.; NSENGIYUMVA, P.; SIBOMANA, L.; TWIZERE, C.; KALISA, W. Analysis of the atmospheric dust in Africa: The breathable dust's fine

particulate matter PM_{2.5} in correlation with carbon monoxide. *Atmospheric Environment*, 117319. 2020. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117319.

RUSSEL, A. Combustion emissions. In: STRAIF, K.; COHEN, A.; SAMET, J. (Ed.). *Air pollution and cancer*. IARC Scientific Publications, n. 161, 2013. cap. 4. p. 37-47.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 2262–2289, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.015.

SANDILANDS, E. A.; BATEMAN, D. N. Carbon monoxide. *Medicine*, v. 44, n. 3, p. 151-152. 2016. DOI:10.1016/j.mpmed.2015.12.024.

SANTOS, C. F. R. T. T.; SILVA, T. B. S. C.; COTRIM, M. E. B.; PIRES, M. A. F. Fatores de Emissão Atmosférica e Análise de Significância aplicada na Gestão da Qualidade do Ar no campus do IPEN/CNEN-SP. In: *Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. ISSN: 2359-1048. 2016.

SAUD, T.; SAXENA, M.; SINGH, D. P.; SARASWATI; DAHIYA, M.; SHARMA, S. K.; DATTA, A.; GADI, R.; MANDAL, T. K. Spatial variation of chemical constituents from the burning of commonly used biomass fuels in rural areas of the Indo-Gangetic Plain (IGP), India. *Atmospheric Environment*, v. 71, p. 158–169, 2013. DOI:10.1016/j.atmosenv.2013.01.053.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SEMA). Resolução nº 016 de 24 de março de 2014. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar da população e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do Estado de forma ambientalmente segura.

SEGUEL, R. J.; MANCILLA, C. A.; SAKAMOTO, P. A. Continuous Measurement of Odorant Composition for Liquefied Petroleum Gas. *Chemical Engineering Transactions*, v. 68, p. 331-336. 2018. DOI: 10.3303/CET1868056.

SEINFELD, J. H. *Atmospheric Physics and Chemistry of Air Pollution*, 738 p., 1986.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1326 p., 1998.

SIMONEIT, B. Biomass burning-A review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Appl. Geochem.* v. 17, p.129-162, 2002.

SINDHWANI, R.; GOYAL, P.; KUMAR, S.; KUMAR, A. Anthropogenic Emission Inventory of Criteria Air Pollutants of an Urban Agglomeration - National Capital Region (NCR), Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 15, p. 1681-1697, 2015. DOI: 10.4209/aaqr.2014.11.0271.

SUGUI, V. R. Inventário e propostas de redução de emissões de poluentes atmosféricos do Aeroporto Internacional de Curitiba – Afonso Pena, em São José

dos Pinhais, PR. 2016. 121 f. Dissertação (Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

TALEGHANI, M.; CLARK, A.; SWAN, W.; MOHEGH, A. Air pollution in a microclimate; the impact of different green barriers on the dispersion. *Science of The Total Environment*, 134649. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134649.

TEGGI, S.; COSTANZINI, S.; GHERMANDI, G.; MALAGOLI, C. e VINCETI, M. A GIS-based atmospheric dispersion model for pollutants emitted by complex source areas. *Science of The Total Environment*, 2017. 610-611, 175-190. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.07.196.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S., Suprimento Energético para Termelétricas, in: *Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação*, Coordenadores: Lora, E.E.S.; Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

TONG, J.; LIU, J.; HAN, X.; WANG, S.; JIANG, X. Characterization of nitrogen-containing species in Huadian shale oil by electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Fuel*, v. 104, p.365–371. 2013. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.09.042.

UL-SAUFIE, A. Z.; YAHAYA, A. S.; RAMLI, N. A.; ROSAIDA, N.; HAMID, H. A.. Future daily PM10 concentrations prediction by combining regression models and feedforward backpropagation models with principle component analysis (PCA). *Atmospheric Environment*, v. 77, p. 621–630. 2013. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emissions Factors. Volume 1: Stationary Point and Area Sources. 5 Ed. 1995.

U.S.EPA. AP-42 Section 1.5 Liquefied Petroleum Gas Combustion. Julho, 2008. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

U.S.EPA. AP-42 Section 1.6 Wood Residue Combustion In Boilers. Setembro, 2003. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

U.S.EPA. AP-42 Section 1.3 Fuel Oil Combustion. Mai, 2010. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

U.S.EPA. Basic Information of Air Emissions Factors and Quantification. 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

U.S.EPA. EPA Can Improve Emissions Factors Development and Management. Report No. 2006-P-00017. 2006.

U.S.EPA. Introduction to Stationary Point Source Emission Inventory Developmen. Emission Inventory Improvement Program - Technical Report Series, v.2, cap. 1. 2001.

U.S.EPA. Introduction to the Emission Inventory Improvement Program. Emission Inventory Improvement Program - Technical Report Series, v.1, julho, 1997.

VARSHNEY, U. K.; KHANDELWAL, T.; BHADORIA, V. S.; AGRAWAL, A. comparative study on particulate matter control techniques: A Review. International Journal of Advanced Science and Technology, v. 29, n.4. 2020. p. 6964-6978.

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) na combustão industrial. Revista IPT Tecnologia e Inovação, v.1, n.3, 2016.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. Revista IPT Tecnologia e Inovação, v.2, n.7, abr., 2018.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. Revista IPT Tecnologia e Inovação, v.2, n.7, p. 28-40, abr., 2018.

WALKER, E.; SLØRDAL, L. H.; GUERREIRO, C.; GRAM, F.; GRØNSKEI, K. E. Air pollution exposure monitoring and estimation. Journal of Environmental Monitoring, v. 1, n. 4, p. 321–326, 1999. DOI:10.1039/a902776i.

WANG, K.; TIAN, H.; HUA, S.; ZHU, C; GAO, J.; XUE, Y.; HAO, J.; WANG, Y.; ZHOU, J. A comprehensive emission inventory of multiple air pollutants from iron and steel industry in China: temporal trends and spatial variation characteristics. Sci of the Tot Envir, v. 559, p. 7-14. 2016.

WANG, X.-C.; KLEMEŠ, J. J.; DONG, X.; FAN, W.; XU, Z.; WANG, Y.; VARBANOV, P. S. Air pollution terrain nexus: A review considering energy generation and consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 105, p. 71-85. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.049.

WANG, Y.; CHENG, K.; TIAN, H.; YI, P.; XUE, Z. Analysis of Reduction Potential of Primary Air Pollutant Emissions from Coking Industry in China. Aerosol and Air Quality Research, v. 18, p. 533-541, 2018. DOI: 10.4209/aaqr.2017.04.0139.

WANG, Y.; LIU, H.; HUANG, Z.; LIU, Z. Study on combustion and emission of a dimethyl ether-diesel dual-fuel premixed charge compression ignition combustion engine with LPG (liquefied petroleum gas) as ignition inhibitor. Energy, v. 96, p. 278–285. 2016. DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.056.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. Progress in Energy and Combustion Science. v. 26, p. 1- 27, 2000.

WIELGOSINSKI, G.; ŁECHTANSKA, P.; NAMIECINSKA, O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion,

Journal of the Energy Institute, v. 90, n. 5, p. 787-796, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2016.06.005>

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Burden of disease from the joint effects of household and ambient Air pollution for 2016. v2. 2018b. Disponível em: <https://www.who.int/airpollution/>. Acesso em: 22 jun. 2020.

WHO. Global Health Observatory data: Mortality and burden of disease from ambient air pollution. 2018a. Disponível em: https://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/burden/en/. Acesso em: 22 jun. 2020.

WU, D.; ZHANG, F.; LOU, W.; LI, D.; CHEN, J. Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of petrol and diesel fuels. *Science of The Total Environment*, v. 605-606, p. 172-179, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.058>.

XIONG, F.; PAN, J.; LU, B.; DING, N.; YANG, J. Integrated technology assessment based on LCA: A case of fine particulate matter control technology in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 268, 122014. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122014.

XING, Y.; BRIMBLECOMBE, P. Role of vegetation in deposition and dispersion of air pollution in urban parks. *Atmospheric Environment*, v. 201, p. 73-83. 2019. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.027.

YANG, H.; LUI, Y.; LUI, J.; WANG, Y.; TAO, S. The roles of the metallurgy, nonmetal products and chemical industry sectors in air pollutant emissions in China. *Environmental Research Letters*, v. 13, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad4ea>.

YU, H.; LI, S. Y.; JIN, G. Z. Hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation of diesel distillate from Fushun shale oil. *Oil Shale*, v. 27, n. 2, p.126-134. 2010. DOI: 10.3176/oil.2010.2.03

ZHANG, J.; XU, J.; QIAN, J.; LIU, L. Denitrogenation of straight-run diesel with complexing extraction. *Petroleum Science and Technology*, v. 31, n. 8, p.777–782. 2013. DOI:10.1080/10916466.2010.493911.

ZHAO, H.; TONG, D.Q.; GAO, C.; WANG, G. Effect of dramatic land use change on gaseous pollutant emissions from biomass burning in Northeastern China. *Atmos. Res.* v. 153, p.429-436, 2015.

ZHOU, Y.; LEVY, J. I. Factors influencing the spatial extent of mobile source air pollution impacts: a meta-analysis. *BMC Public Health*, v. 7, n. 1, 2007. DOI:10.1186/1471-2458-7-89.

ZHOU, Z.; TAN, Q.; DENG, Y.; WU, K.; YANG, X.; ZHOU, X. Emission inventory of anthropogenic air pollutant sources and characteristics of VOCs species in Sichuan Province, China. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2019. DOI: 10.1007/s10874-019-9386-7.

ZHU, Z.; CHEN, B.; QIU, S.; WANG, R.; MA, L. e QIU, X. The GIS-Based Approach for Optimal Design of Air Quality Monitoring Network for Management of Chemical Clusters. Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL Workshop on Emergency Management Using - EM-GIS'17, 2017. DOI:10.1145/3152465.3152479.

ANEXO I

QUADRO I - DADOS DO LEVANTAMENTO SOBRE AS FONTES PONTUAIS E ESTIMATIVA DAS EMISSÕES SEGUNDO AP-42

| Atividade | Potência (MW) | Combustível | Emissão CO (kg/h) | Emissão NO _x (kg/h) | Emissão MP (kg/h) |
|--|---------------|---|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| Abatedouro | 3,9 | Biomassa | 3,622 | 2,962 | 2,518 |
| Armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos | 22 | Cavaco | 20,434 | 16,711 | 10,796 |
| Creatório | 2,23 | GLP | 0,298 | 0,525 | 0,028 |
| Fabricação de artefatos de fibra de vidro | 1,9 | Óleo combustível (BPF) (Óleo nº 5 ou 6) | 0,102 | 1,124 | 0,235 |
| Fabricação de carvão vegetal | 0,01 | Lenha | 0,009 | 0,008 | 0,006 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 31 | Cavaco | 28,793 | 23,548 | 3,405 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 31 | Cavaco | 28,793 | 23,548 | 3,405 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 0,01 | Eucalipto | 0,009 | 0,008 | 0,005 |
| Fabricação de cerveja, chopes e maltes | 8 | GLP | 1,072 | 1,886 | 0,101 |
| Fabricação e condicionamento de pneumático | 0,35 | Lenha | 0,325 | 0,266 | 0,226 |
| Fabricação e condicionamento de pneumático | 1,15 | Biomassa | 1,068 | 0,874 | 0,742 |
| Indústria alimentícia | 0,9 | Lenha | 0,836 | 0,684 | 0,581 |
| Indústria alimentícia | 0,27 | Lenha | 0,251 | 0,205 | 0,174 |
| Indústria alimentícia | 0,27 | Lenha | 0,251 | 0,205 | 0,174 |
| Indústria alimentícia | 0,07 | Serragem | 0,065 | 0,053 | 0,045 |
| Indústria alimentícia | 1,75 | Eucalipto | 1,625 | 1,329 | 1,130 |
| Indústria alimentícia | 0,65 | GLP | 0,087 | 0,153 | 0,008 |
| Indústria alimentícia | 0,6 | GLP | 0,080 | 0,141 | 0,008 |
| Indústria alimentícia | 0,03 | GLP | 0,004 | 0,007 | 0,000 |
| Indústria da madeira | 6,34 | Cavaco | 5,885 | 4,813 | 4,090 |
| Indústria da madeira | 24 | Biomassa | 22,291 | 18,230 | 15,492 |
| Indústria da madeira | 1,92 | Cavaco | 1,783 | 1,458 | 1,239 |

| | | | | | |
|-------------------------------|-------|------------------------------|--------|---------|--------|
| Indústria da madeira | 3,84 | Cavaco | 3,567 | 2,917 | 1,884 |
| Indústria da madeira | 5,74 | Cavaco | 5,331 | 4,360 | 3,705 |
| Indústria da madeira | 0,11 | Madeira refil (9%) | 0,102 | 0,084 | 0,071 |
| Indústria da madeira | 2,7 | Cavaco | 2,508 | 2,051 | 1,743 |
| Indústria da madeira | 0,48 | Lenha | 0,446 | 0,365 | 0,310 |
| Indústria da madeira | 3,84 | Cavaco | 3,567 | 2,917 | 1,884 |
| Indústria da madeira | 3,1 | Cavaco | 2,879 | 2,355 | 1,521 |
| Indústria da madeira | 12,19 | Cavaco | 11,322 | 9,260 | 5,982 |
| Indústria de papel e celulose | 14,40 | Biomassa | 13,375 | 10,938 | 7,066 |
| Indústria de papel e celulose | 48 | Biomassa | 44,582 | 36,461 | 23,554 |
| Indústria química | 1,44 | Lenha | 1,337 | 1,094 | 0,707 |
| Indústria química | 0,05 | Cavaco | 0,046 | 0,038 | 0,025 |
| Indústria química | 0,05 | Cavaco | 0,046 | 0,038 | 0,032 |
| Indústria química | 0,05 | Cavaco | 0,046 | 0,038 | 0,025 |
| Indústria química | 0,05 | Cavaco | 0,046 | 0,038 | 0,032 |
| Indústria química | 1,15 | Carvão vegetal | 1,068 | 0,874 | 0,742 |
| Indústria química | 0,01 | Carvão vegetal | 0,009 | 0,008 | 0,006 |
| Serviço de saúde | 0,01 | Lenha | 0,009 | 0,008 | 0,006 |
| Serviço de saúde | 1,05 | Briquete de biomassa | 0,975 | 0,798 | 0,678 |
| Usina de asfalto | 2,3 | Eucalipto | 2,136 | 1,747 | 1,485 |
| Usina de asfalto | 5,3 | GLP | 0,710 | 1,250 | 0,067 |
| Usina de asfalto | 40 | Óleo de xisto (Óleo nº 4) | 36,589 | 343,938 | 62,202 |
| Usina de asfalto | 54,6 | Óleo de xisto (Óleo nº 4) | 49,944 | 469,475 | 84,905 |
| Usina de asfalto | 0,58 | Óleo diesel (Óleo nº 1 ou 2) | 0,035 | 0,141 | 0,023 |

FONTE: O autor (2020).