

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA

FERNANDO JOSÉ DOS SANTOS

ANÁLISE DE INTERVENÇÕES VIÁRIAS EM TRECHO URBANO NA FLUIDEZ E
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR MEIO DE MODELAGEM DE
MICROSSIMULAÇÃO – ESTUDO DE CASO JOINVILLE, SC

Joinville

2022

FERNANDO JOSÉ DOS SANTOS

ANÁLISE DE INTERVENÇÕES VIÁRIAS EM TRECHO URBANO NA FLUIDEZ E
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR MEIO DE MODELAGEM DE
MICROSSIMULAÇÃO – ESTUDO DE CASO JOINVILLE, SC

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transporte e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias.

Joinville

2022

FERNANDO JOSÉ DOS SANTOS

ANÁLISE DE INTERVENÇÕES VIÁRIAS EM TRECHO URBANO NA FLUIDEZ E
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR MEIO DE MODELAGEM DE
MICROSSIMULAÇÃO – ESTUDO DE CASO JOINVILLE, SC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transporte e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 22 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias
Orientador
Presidente

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
Professora do Centro Tecnológico de Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Luisa de Moura Chaves
Gerente Sênior de Desenvolvimento de Negócios
PTV Brasil

Dedico este trabalho a minha mãe Teresinha, pelo apoio desde o começo.
A minha esposa Daiane por ter embarcado nessa ideia e meus filhos Murilo e
Mariana pela compreensão e colaboração.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por estar conosco desde o início desse longo projeto, à minha esposa Daiane que aceitou e compreendeu a importância dessa fase, aos meus filhos Murilo e Mariana que entenderam a dedicação que esse projeto necessitava e sempre foram colaborativos.

Aos professores do CTJ e especialmente ao meu orientador Helry que acreditou na ideia e incentivou a buscar o meu melhor.

Aos colegas do Detrans da Prefeitura de Joinville, especialmente os gerentes Demaria, Guilherme, Cadu e o supervisor Fábio que colaboraram com os dados obtidos junto à prefeitura.

À FAPESC por ter fornecido o financiamento do VISSIM.

“Não podemos prever o futuro, mas podemos criá-lo.”

(Peter Drucker)

RESUMO

A urbanização das cidades é um problema cada vez mais comum principalmente nas grandes cidades. Um efeito da urbanização é o aumento dos congestionamentos e a degradação da qualidade do ar. Os veículos automotores são responsáveis diretos por mais da metade da poluição gerada nos grandes centros urbanos. Considerando isso, a fim de mitigar parte dos efeitos negativos da urbanização, propõe-se a análise de um trecho adensado do município de Joinville, do ponto de vista da fluidez e emissão de poluentes atmosféricos, por meio da ferramenta de simulação em microescala VISSIM e módulo de emissão EnViVER. Como objeto de estudo, foi utilizado o cruzamento das ruas Getúlio Vargas e Ministro Calógeras com a avenida Juscelino Kubitschek, em função de históricos problemas do trecho relacionados à fluidez. Foram propostos cinco cenários, onde se pode observar a melhoria de 49% nas medidas de desempenho de comprimento médio de fila de tráfego e 10% das emissões de poluentes, com possibilidade de futuras intervenções e melhorias, mostrando o potencial de intervenções no fluxo e de novas tecnologias e medidas mitigadoras de fluxo quanto a parâmetros de emissões.

Palavras-chave: Vissim. EnViver. Emissões veiculares. Congestionamentos

ABSTRACT

The urbanization process has been causing negative consequences for cities, especially the big ones. Some of the common impacts of it are traffic congestions and decreased air quality. Motor vehicles are directly responsible for more than half of the air pollution generated in highly urbanized cities. This analysis attempts to find alternatives to mitigate these negative impacts using the microsimulation in microscale tool VISSIM and the emissions module of EnViVER. The object in analysis was the intersection of Getúlio Vargas, Juscelino Kubitschek and Ministro Calógeras streets, in a dense urban area in the city of Joinville, Brazil, which has been historically affected by high traffic congestions. Five scenarios are presented and the simulations show a 49% improvement in performance measurements of average traffic queue length and a 10% decrease in emissions, showing potential points of intervention and use of new technologies.

Keywords: Vissim. EnViver. Vehicle emissions. Traffic jams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta metodológica	19
Figura 2 - Variação com o tempo da taxa de descarga da fila	21
Figura 3 - Modelo de Wiedemann	25
Figura 4 - Fluxograma das etapas do método.....	37
Figura 5 - Mapa e croqui do local de estudo	44
Figura 6 - Extensão da área de estudo	44
Figura 7 - Codificação da rede no VISSIM	46
Figura 8 - Tempo semafórico	46
Figura 9 - Pontos de início e fim das medições de tempo	47
Figura 10 - Apresentação das emissões de poluentes atmosféricos	51
Figura 11 - Emissão total de CO ₂	52
Figura 12 - Emissão total de NO _x	53
Figura 13 - Emissão total de Material Particulado	53
Figura 14 - Alteração cenário 1	55
Figura 15 - Cenário proposto 2 - Movimentos proibidos.....	57
Figura 16 - Plano de fases do semáforo após utilização do método de Webster.....	59
Figura 17 - Cenário 4 - Movimentos permitidos.....	61
Figura 18 - Modelo de micro-ônibus - Imagem externa	63
Figura 19 - Modelo de micro-ônibus - Imagem interna.....	63
Figura 20 - Redução dos tempos de viagem (em %)	65
Figura 21 - Redução percentual do comprimento da fila média e da fila máxima	66
Figura 22 - Redução percentual dos tempos médios de parada e dos atrasos por veículos	67
Figura 23 - Percentual de melhora dos tempos de fila	68
Figura 24 - Aumento das velocidades médias - aritmética e harmônica	68
Figura 25 - Emissões de CO ₂ por cenário simulado	69
Figura 26 - Emissões de NO _x por cenário simulado	70
Figura 27 - Comparação das emissões de Material Particulado por cenário	70
Figura 28 - Emissões de CO ₂ por quilômetro - Cenário base	78
Figura 29 - Emissões de NO _x por km – Cenário base	79
Figura 30 - Emissões de Material Particulado por quilômetro - Cenário base.....	79

Figura 31 - Concentração das emissões de CO ₂ – Cenário base	80
Figura 32 - Concentração das emissões de NO _x – Cenário base.....	81
Figura 33 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário base	82
Figura 34 - Total de emissões de CO ₂ – Cenário 1	80
Figura 35 - Total de emissões de NO _x – Cenário 1	80
Figura 36 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 1	81
Figura 37 - Emissões de CO ₂ por km – Cenário 1.....	81
Figura 38 - Emissões de NO _x por km – Cenário 1	82
Figura 39 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 1.....	82
Figura 40 - Concentração das emissões de CO ₂ – Cenário 1	83
Figura 41 - Concentração das emissões de NO _x – Cenário 1	83
Figura 42 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 1	84
Figura 43 - Total de emissões de CO ₂ – Cenário 2	84
Figura 44 - Total de emissões de NO _x – Cenário 2	85
Figura 45 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 2	85
Figura 46 - Emissões de CO ₂ por km – Cenário 2.....	86
Figura 47 - Emissões de NO _x por km – Cenário 2.....	86
Figura 48 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 2.....	87
Figura 49 - Concentração das emissões de CO ₂ – Cenário 2	87
Figura 50 - Concentração das emissões de NO _x – Cenário 2	88
Figura 51 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 2.....	88
Figura 52 - Total de emissões de CO ₂ – Cenário 3	89
Figura 53 - Total de emissões de NO _x – Cenário 3	89
Figura 54 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 3.....	90
Figura 55 - Emissões de CO ₂ por km – Cenário 3.....	90
Figura 56 - Emissões de NO _x por km – Cenário 3.....	91
Figura 57 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 3.....	91
Figura 58 - Concentração das emissões de CO ₂ – Cenário 3	92
Figura 59 - Concentração das emissões de NO _x – Cenário 3	92
Figura 60 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 3.....	93
Figura 61 - Total de emissões de CO ₂ – Cenário 4	93
Figura 62 - Total de emissões de NO _x – Cenário 4	94
Figura 63 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 4.....	94
Figura 64 - Emissões de CO ₂ por km – Cenário 4.....	95

Figura 65 - Emissões de NOx por km – Cenário 4	95
Figura 66 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 4.....	96
Figura 67 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 4	96
Figura 68 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 4	97
Figura 69 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 4	97
Figura 70 - Total de emissões de CO2 – Cenário 5	98
Figura 71 - Total de emissões de NOx – Cenário 5	98
Figura 72 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 5	99
Figura 73 - Emissões de CO2 por km – Cenário 5.....	99
Figura 74 - Emissões de NOx por km – Cenário 5	100
Figura 75 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 5.....	100
Figura 76 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 5	101
Figura 77 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 5	101
Figura 78 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 5.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Programação semafórica rua Ministro Calógeras cruzamento rua Getúlio Vargas e Avenida JK.....	45
Quadro 2 - Estimativa de poluição atmosférica causada pelo fluxo de tráfego observado.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores transientes para a correção de NOx	35
Tabela 2 - Fatores transientes para a correção de CO	35
Tabela 3 - Fatores transientes para a correção de Material Particulado	35
Tabela 4 - Volume total de tráfego no cruzamento.....	45
Tabela 5 - Tempos coletados na aproximação (s)	47
Tabela 6 - Média dos tempos nas aproximações (s).....	48
Tabela 7 - Comparação entre tempos de viagem simulado e coletado em campo (s)	49
Tabela 8 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)	50
Tabela 9 - Dados de atrasos dos veículos (s)	50
Tabela 10 - Tempo de filas (s) e velocidades (km/h).....	50
Tabela 11 - Dados das filas formada nas aproximações (m)	55
Tabela 12 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem (s)	55
Tabela 13 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)	56
Tabela 14 - Dados das filas formadas nas aproximações.....	57
Tabela 15 - Dados de atrasos dos veículos e tempo de viagem (s).....	57
Tabela 16 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)	58
Tabela 17 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)	59
Tabela 18 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem (s)	59
Tabela 19 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)	60
Tabela 20 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)	61
Tabela 21 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem (s)	61
Tabela 22 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)	62
Tabela 23 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)	64
Tabela 24 - Dados de atrasos dos veículos e tempo de viagem (s).....	64
Tabela 25 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)	64
Tabela 26 - Emissões de poluentes atmosféricos na rede simulada.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

Detrans – Departamento de Trânsito de Joinville

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ONU – Organização das Nações Unidas

PLANMOB – Plano de Mobilidade da cidade de Joinville

SEPUD - Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMÁTICA E QUESTÃO DE PESQUISA	16
1.2. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. JUSTIFICATIVA	17
1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	23
2.1.1. Modelo de carro seguidor ou perseguição veicular (<i>car-following</i>)	24
2.1.2. Modelo de aceitação de brechas (<i>gap acceptance</i>)	26
2.1.3. Modelo de mudança de faixa (<i>lane changing</i>)	27
2.2. EMISSÃO DE POLUENTES	27
2.2.1 – Óxidos de carbono	29
2.2.2 – Óxidos de nitrogênio (NO)	30
2.2.3 – Dióxido de enxofre (SO₂)	30
2.2.4 – Hidrocarbonetos (HC)	31
2.2.5 – Material particulado	31
2.3. MODELAGEM DINÂMICA DE EMISSÃO DE POLUENTES	32
2.4. MODELAGEM UTILIZANDO O SOFTWARE VISSIM E ENVIVER	33
3. METODOLOGIA	37
3.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
3.2. CODIFICAÇÃO DA REDE DE ESTUDO	38
3.3. CALIBRAÇÃO DA REDE	39
3.5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	40
3.6. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	40
3.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES	41
3.8. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES	42

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	43
4.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
4.2. CODIFICAÇÃO DA REDE DE ESTUDO.....	44
4.3. CALIBRAÇÃO DA REDE	46
4.5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	51
4.6. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS.....	54
4.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES	65
4.8. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES.....	69
5. CONCLUSÃO	72
ANEXO A – GRÁFICOS DE EMISSÕES.....	78

1. INTRODUÇÃO

Os congestionamentos nos grandes centros urbanos são um problema grave e caracterizam grandes desafios na vida da população. Mesmo que tais centros urbanos tenham outros problemas, poucos afetam uma parcela tão grande das pessoas diariamente, por esse motivo, os congestionamentos ganham atenção especial por parte das autoridades, da população e da imprensa (MANVILLE; TAYLOR; SHOUP, 2021).

Com mais de 80% da população mundial vivendo em cidades, e com a perspectiva de que esse percentual se aproxime de 91% até o ano de 2030, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU,2019), as políticas públicas para a mobilidade urbana se tornam um desafio. A expressão mobilidade vem substituindo o termo transporte para englobar os mais variados modos, sejam motorizados ou não motorizados. A ideia é mudar paradigmas e melhorar a sustentabilidade dos transportes (MACHADO; PICCININI, 2018)

Houve, nas últimas décadas, uma mudança no padrão da mobilidade nas cidades brasileiras, a substituição do transporte público pelo transporte individual, principalmente entre as classes média e baixa e também nas cidades de pequeno e médio porte. Ao comparar as pesquisas de Orçamentos Familiares dos anos de 2008 e de 2017 observou-se uma redução de 18,9 pontos percentuais de famílias que utilizavam transporte coletivo (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA, 2021).

Por outro lado, houve um aumento de 16,1 pontos percentuais de famílias que utilizavam o transporte individual, sendo que as despesas totais com transporte permaneceram estáveis nesse mesmo período. Esse resultado mostra a tendência de queda do uso do transporte coletivo e a migração desses usuários, na comparação, para o transporte individual, tendência essa que já vem sendo observada, pelo menos, desde os anos 80 (IPEA, 2021).

Com o aumento do transporte individual, há uma deterioração na qualidade de vida da população. Gerando um aumento do stress, da poluição atmosférica e do número de acidentes de trânsito. Também se observa um aumento na desigualdade social, já que a população mais pobre é a que, geralmente, mora na periferia e que

compromete maior parcela dos seus rendimentos com o transporte (VIANNA; YOUNG, 2015).

Os custos sociais decorrentes de acidentes de trânsito, por exemplo, são elevados e impactam diretamente na economia. Em vários locais do mundo, os acidentes de trânsito representam a principal causa de morte não natural. No ano de 2015, segundo o Ministério da Saúde (BRASIL DATASUS, 2017), foi registrado no país 38.651 óbitos decorrentes de acidentes de trânsito, dos quais 21,4% correspondiam a vítimas mais vulneráveis do sistema de transportes (pedestres e ciclistas) (TISCHER, 2019).

Outro problema oriundo dos congestionamentos é a poluição atmosférica causada pelos veículos com motor a combustão. A definição de poluente é qualquer substância que, presente no ar, acima de determinada concentração, são nocivas à saúde. Os poluentes causam inconvenientes ao bem-estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora ou são prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2021).

Os grupos de poluentes que servem como indicadores da qualidade do ar foram escolhidos devido ao seu potencial de danos à saúde e sua frequência na atmosfera. Nesse grupo, os materiais particulados ganham um destaque, por conta de sua toxicidade e proporção de emissões oriundas de veículos a diesel. Os veículos automotores são uma das principais fontes de emissão de material particulado, que também podem se formar na atmosfera a partir da reação química com dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs). Essas substâncias também são emitidas pela combustão de veículos automotores (CETESB, 2021).

O aumento da poluição atmosférica é impulsionado pelo aumento do número de veículos circulando pelas grandes cidades. Segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2021), em agosto de 2021, a frota brasileira, no total, era de mais de 110 milhões veículos emplacados, sendo quase 59 milhões são automóveis. Somente no estado de Santa Catarina são 5 milhões e 700 mil veículos, sendo que desse total, mais de 3 milhões são automóveis. Nesse sentido, propõe-se avaliar a problemática do tráfego de veículos em um trecho do município de Joinville e analisar algumas questões de pesquisa relativas a tais atividades.

1.1. PROBLEMÁTICA E QUESTÃO DE PESQUISA

As grandes cidades brasileiras, há alguns anos, vem apresentando saturação do transporte individual com demanda cada vez maior do espaço urbano pelos automóveis. Consequentemente, os grandes centros urbanos passam por um processo de deterioração ambiental, gerando, cada vez mais, prejuízos a toda a população (MACHADO; PICCININI, 2018)

A poluição ambiental, a poluição visual e os congestionamentos, são a parte visível desses prejuízos. Também há os problemas que não podem ser vistos, como a desigualdade social, o tempo perdido e o stress causado pelo trânsito, com cada vez mais desafios para os gestores municipais (VIANNA; YOUNG, 2015).

Diante do exposto, surgem as seguintes questões que buscam analisar os seguintes problemas.

- É possível analisar uma alteração viária sem implantá-la na prática?
- Há a necessidade de obras de grande porte para solucionar um problema de congestionamento?
- É possível analisar as emissões atmosféricas provocadas por veículo automotor em trecho urbano?
- O transporte público é capaz de ser atrativo para o usuário do transporte individual?

A análise desses problemas pode ser feita com o auxílio de ferramentas de simulação, devidamente calibradas, recriando o cenário existente e avaliando alterações, tanto do ponto de vista ambiental como de tráfego. Dessa forma é possível a inclusão de avaliação do ponto de vista ambiental, além das questões de tráfego ao estudo.

Diante disto, o presente trabalho visa analisar e propor cenários alternativos para questões referentes aos problemas de fluxo de tráfego em área urbana utilizando ferramentas de simulação.

1.2. OBJETIVOS

Considerando a problemática foi analisado um trecho de alto fluxo da cidade de Joinville, do ponto de vista de implementação de medidas mitigadoras de fluxo de

tráfego e de impactos ambientais (poluentes atmosféricos), foi determinado neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Modelar e analisar, através de uma ferramenta de simulação em microescala, os fluxos de tráfego na hora pico.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar o cruzamento das ruas Getúlio Vargas, Ministro Calógeras e Avenida Juscelino Kubitschek propondo melhorias para a mitigação dos problemas de fluidez e emissão de poluentes atmosféricos;
- Identificar os principais fluxos de tráfego e seus impactos na fluidez das vias atingidas pelo cruzamento principal em análise;
- Codificar e calibrar um modelo de microsimulação na realidade do trecho observado;
- Analisar o trecho do ponto de vista da fluidez e emissões de poluentes atmosféricos por meio da simulação de tráfego;
- Propor cenários para o conjunto de conflitos do cruzamento a fim de melhorar a fluidez do tráfego e parâmetros ambientais.

1.2. JUSTIFICATIVA

O município de Joinville é o maior município do estado de Santa Catarina. Com 597.658 habitantes segundo estimativas de 2020 da Secretaria de Saúde e uma frota de mais de 447 mil veículos, sendo 283 mil automóveis em agosto de 2021 (DENATRAN, 2021).

Devido ao aumento da frota de veículos, há, nos últimos anos, uma considerável piora na mobilidade urbana de Joinville. Percebe-se um crescimento na proporção de veículos por habitantes que era de 0,66 em 2015 para mais de 0,74 em 2021. Entre os anos de 2005 e 2015 a frota de veículos aumentou em torno de 175% (JOINVILLE PLANMOB, 2015).

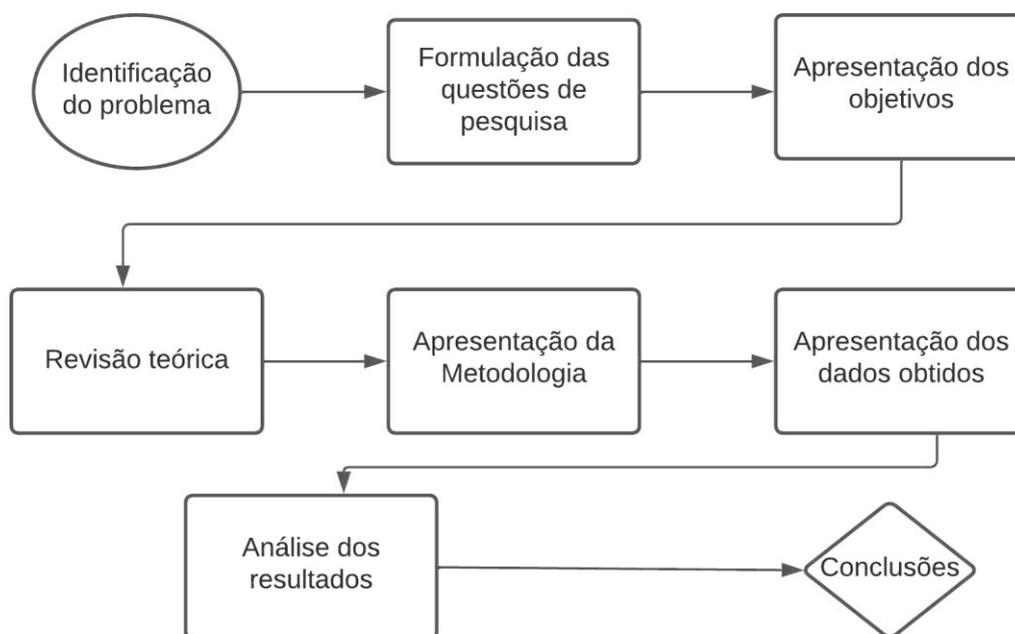
Outro fator que contribui para a piora da mobilidade urbana é o aumento do número de visitantes que se deslocam, diariamente de suas cidades de origem, para trabalho, lazer, educação ou saúde. Também a constante falta de recursos públicos para investimentos em ações de melhorias de infraestrutura, equipamentos de transporte público entre outros contribuem para a deterioração da mobilidade urbana e aumento do grau de insatisfação da população (JOINVILLE PLANMOB, 2015)

No mundo todo, surgiu o interesse pela criação e implementação de métodos para mensurar os congestionamentos. As metodologias desenvolvidas variam desde simples medições de filas até métodos complexos que levam em consideração os custos ligados aos congestionamentos e que demoram anos para serem finalizados. Os estudos visam estimar os custos (social e ambiental) dos congestionamentos para a elaboração de medidas mitigadoras e formas de financiamento de novos sistemas de mobilidade (VASCONCELLOS, 2014).

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado na identificação do problema, onde foi avaliada a problemática da dinâmica do tráfego de maneira genérica, a formulação das questões de pesquisa que direcionaram os objetivos do trabalho, a apresentação dos objetivos que foram buscados na pesquisa. Após essas etapas iniciais, foi realizada uma revisão teórica que serviu de base para o desenvolvimento da metodologia da pesquisa. As etapas finais consistem na apresentação e análise dos dados obtidos e dos resultados alcançados durante o desenvolvimento do trabalho. A exposição dos conceitos e assuntos de maneira mais profunda, será apresentada nos próximos capítulos conforme a proposta metodológica apresentada na figura 1.

Figura 1 - Proposta metodológica



Fonte: Autor

A etapa metodológica objetiva apresentar a forma de realização do trabalho, em seguida serão apresentados os dados obtidos em campo e na pesquisa, e por fim, haverá a apresentação dos resultados da pesquisa e as conclusões do exposto trabalho. Conforme a figura 1, o próximo capítulo versará sobre o desenvolvimento teórico onde foi fundamentado esse trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos que serão utilizados nesse trabalho, como os conceitos de sinalização semafórica, simulação de tráfego e poluição ambiental. Serão analisados, por meio de referências bibliográficas, o desenvolvimento e a aplicabilidade da microssimulação de tráfego e como essa ferramenta pode auxiliar na mitigação de problemas na fluidez e dos impactos ambientais.

A sinalização semafórica tem por finalidade informar os usuários da via sobre o direito de passagem em interseções onde o espaço viário é disputado por movimentos conflitantes ou que possam comprometer a segurança dos usuários. A sinalização semafórica pode ser de regulamentação, com a função de controle do trânsito, ou de advertência, com a função de indicar situações perigosas ou obstáculos na via (CONTRAN, 2014).

Para a otimização dos tempos do semáforo, pode-se utilizar o Método de Webster para calcular o tempo de ciclo ótimo de um cruzamento conforme a equação 1 (EJZENBERG, 2005).

$$C_o = \frac{1,5.L+5}{1-Y} \quad (1)$$

Onde:

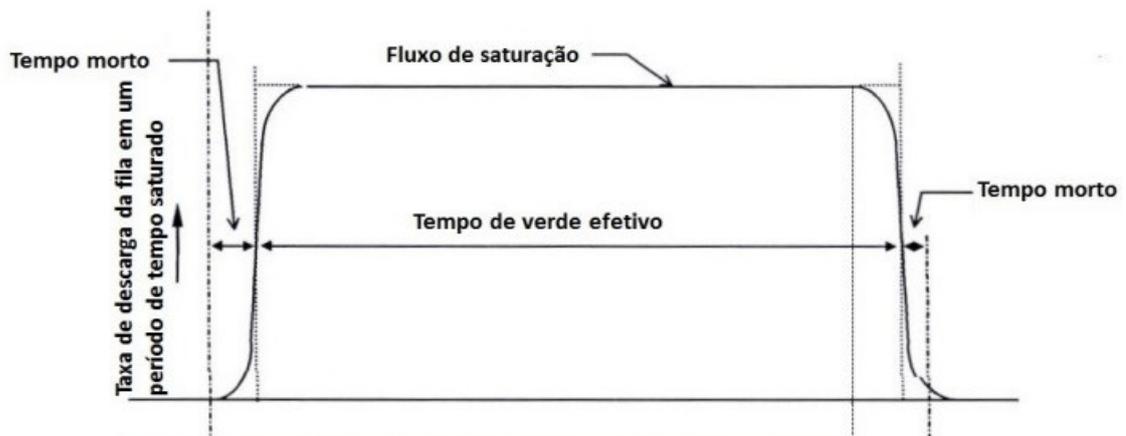
- C_o = ciclo ótimo [s]
- L = tempo morto total do cruzamento [s]
- Y = Grau de saturação do semáforo, soma das taxas de ocupação

O tempo morto é o período em que não há a passagem de veículos. Usualmente se incorpora um tempo de vermelho geral ao amarelo por questão de segurança. Para obter o tempo morto do estágio (L), considerando como “ l ” o período de entreverdes e “ a ” o tempo de amarelo, tem-se a equação 2 (DENATRAN, 2014).

$$L = l - a + i \quad (2)$$

O grau de saturação é obtido através do fluxo de saturação que pode ser obtido quando há uma fila contínua e se o tempo de verde for o tempo total. No início do tempo de verde, os veículos demoram certo tempo para o início do movimento e atingir a velocidade desejada, porém após alguns segundos a fila formada se desmancha a uma taxa constante chamada fluxo de saturação, conforme figura 2 (MING, 2001).

Figura 2 - Variação com o tempo da taxa de descarga da fila



Fonte: Ming, 2001

Chamando de G o tempo de verde efetivo somado ao período morto tem-se:

$$g = G - i \quad (3)$$

$$Capacidade = \frac{g \cdot S}{c} \text{ [veículos/h]} \quad (4)$$

Onde:

- g = verde efetivo [s]
- c = tempo de ciclo [s]
- i = tempo morto [s]
- S = fluxo de saturação [veículos/hora verde]

O tempo de verde no foco semafórico é:

$$Verde\ de\ foco = g + i - a = G - a \quad (5)$$

Onde “a” é o tempo de amarelo.

Para o cálculo do tempo de ciclo mínimo, que é tempo que é apenas suficiente passar todo o tráfego, tem-se a equação (6).

$$Cm = \frac{L}{1-Y} \quad (6)$$

Onde:

- Cm = ciclo mínimo [s]
- Y = soma das taxas de ocupação
- L = tempo morto total do cruzamento [s]

A partir dos tempos de ciclo ótimo e mínimo, pode-se obter os tempos de verde de cada aproximação. Esse tempo de verde é proporcional as taxas de ocupação, logo tem-se a equação 7 (MING, 2001).

$$gi = \frac{yi}{Y} (Co - L) \quad (7)$$

Onde:

- gi = verde da aproximação desejada [s]
- yi = taxa de ocupação da aproximação desejada
- Y = soma das taxas de ocupação
- Co = tempo de ciclo ótimo [s] (pode ser substituído pelo tempo de ciclo mínimo)
- L = tempo morto total do cruzamento [s]

O uso da simulação de tráfego tem se mostrado promissor, pois ao propor alterações na infraestrutura viária, tem-se um elevado custo econômico e social, mitigado pela agilidade e versatilidade do ferramental. A implementação de

ferramentas computacionais, possibilitam a reprodução da infraestrutura existente, além do comportamento dos condutores e seus veículos, possibilitando a análise de soluções diversas para os problemas de tráfego de menor custo (NORONHA, 2016).

Segundo Lemos, (2018) os modelos de simulação de tráfego, são classificados de acordo com o nível de detalhamento proposto, na literatura destaca-se:

- Macroscópico: não há a demonstração das interações entre os indivíduos, o sistema é representado de maneira agregada a partir de dados de volume, velocidades e densidades. Esse modelo é computacionalmente eficiente, porém não há a representação de um maior nível de detalhes dos indivíduos.
- Mesoscópico: é o intermediário entre o macroscópico e o microscópico, apresenta um nível de abstração maior e um nível de detalhamento intermediário. O comportamento dos veículos é considerado individualmente, porém os movimentos são analisados em grupos.
- Microscópico: há um grande nível de detalhes, é um modelo custoso do ponto de vista computacional devido à quantidade de parâmetros analisados. Os veículos têm seus comportamentos analisados individualmente levando em consideração os outros veículos e a estrutura viária que está sendo utilizada. Pode se citar como exemplo de modelos comportamentais, as teorias de car-following (carro seguidor) e lane changing (mudança de faixas) utilizado no VISSIM.

Em função das características dos modelos microscópicos de simulação de tráfego, tal abordagem será discutida e aplicada neste estudo, sendo apresentada com maior detalhamento nos próximos itens.

2.1. MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Os simuladores microscópicos têm por característica a análise do comportamento individual de cada veículo, se tornando ideal para a análise em trechos urbanos, pois esses simuladores reproduzem da forma fidedigna o comportamento observado em campo. A principal vantagem desse modelo de simulação é a possibilidade da individualização da análise (NORONHA, 2016).

Outra vantagem da simulação microscópica é a possibilidade de analisar a reação dos condutores em diferentes cenários que se pretende implementar no trecho

em estudo, ou seja, é possível observar a mudança de comportamento dos condutores em cada alteração proposta. Eventualmente pode ser observado alguma reação não desejada durante a alteração, o que torna a correção do efeito com menor custo econômico, social e ambiental (LACERDA; CASTRO-NETO; 2014).

A simulação microscópica de tráfego fornece a estrutura tecnológica para reproduzir as condições de tráfego antes e após alterações viárias, sendo possível avaliar seus resultados com determinadas alterações de parâmetros comportamentais dos condutores. Dessa forma é possível analisar toda a dinâmica do fenômeno de tráfego com o passar do tempo e observar a reação dos condutores nas vias após essas mudanças (BARCELÓ et al. 2003).

Ao final da simulação, uma combinação de resultados é fornecida, tais resultados possibilitam uma análise mais refinada dos cenários propostos na simulação. Na microssimulação também podem ser modelados cenários de alta complexidade, com alto nível de detalhamento, como, por exemplo, uma interseção com ordem de preferência, esses fatores fazem da microssimulação ideal para áreas urbanas e de fluxo interrompido (BARCELÓ, 2010).

Os principais submodelos utilizados na microssimulação são os modelos de car-following, aceitação de brecha (*gap acceptance*) e mudança de faixa (*lane-changing*), apresentados a seguir.

2.1.1. Modelo de carro seguidor ou perseguição veicular (*car-following*)

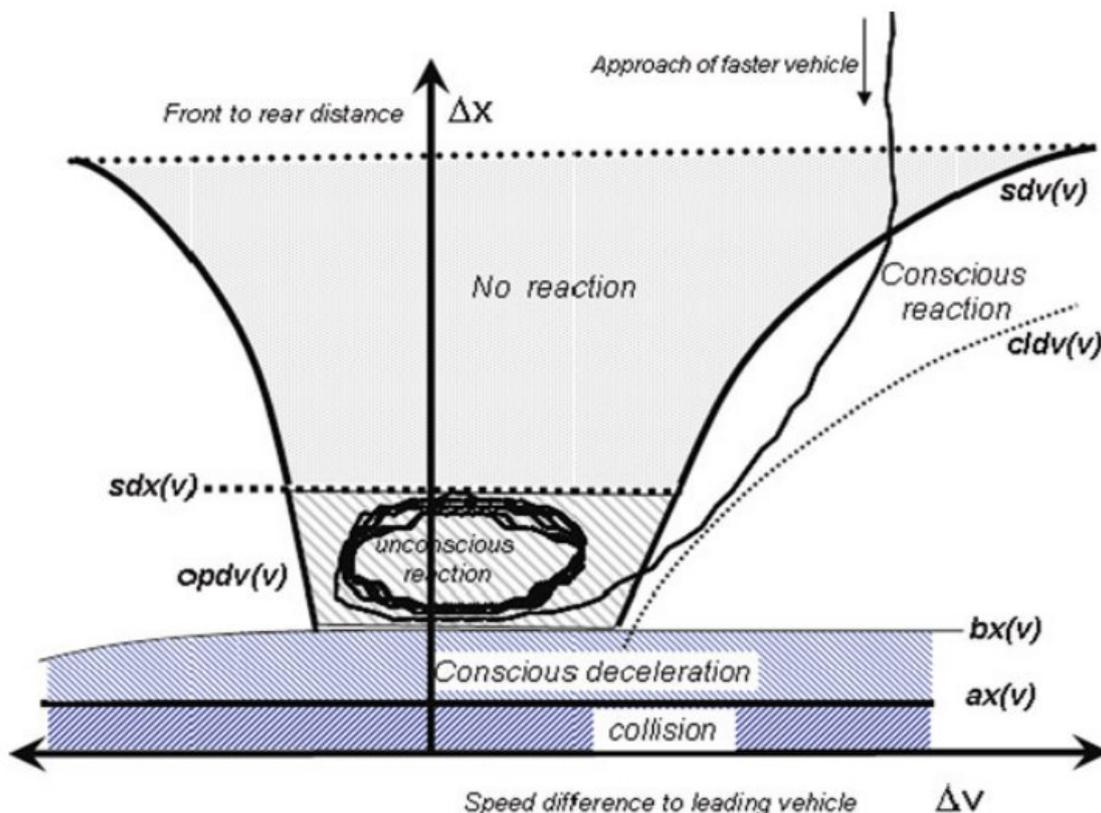
O modelo de *car-following* é o modelo mais utilizado nas ferramentas de microssimulação, pois leva em conta um padrão comportamental do condutor de aproximar-se ou afastar-se do veículo que está à frente utilizando a percepção de variação de velocidade entre os veículos. Esse modelo utiliza os parâmetros de aceleração e de desaceleração para manter uma distância uniforme dos demais veículos, o que limitará a velocidade desejada pelo condutor (CHAVES, 2017).

Os primeiros modelos de car-following foram desenvolvidos nos anos de 1950 por Reuschel (1950) e por Pipes (1953). O modelo de Pipes se baseia no conceito de distância entre veículos que trafegam em uma corrente de tráfego sugerida no Califórnia Motor Vehicle Code, que diz que uma distância segura de seguimento é o espaço equivalente a um carro a cada dez milhas por hora de velocidade (BARCELÓ, 2010).

Neste trabalho, discute-se com maior detalhamento o modelo de Wiedemann (1974), que é um modelo psicofísico, cuja ideia principal é que um veículo seguidor irá variar a sua velocidade a fim de manter certa distância do veículo precedido. A partir da percepção de distância entre os veículos, o condutor irá acelerar ou desacelerar o veículo a fim de manter essa distância ideal de seguimento (LACERDA; CASTRO-NETO; 2014).

O ponto de ação da reação consciente depende da diferença de velocidade, distância relativa ao veículo líder e comportamento do motorista. Existem quatro estágios diferentes de seguir um veículo líder. A Figura 3, indica o processo oscilante dessa abordagem (BARCELÓ, 2010).

Figura 3 - Modelo de Wiedemann



Fonte: Barceló (2010, p.76).

- $ax(v)$: Distância desejada entre as frentes de dois veículos sucessivos em fila de espera. $ax := VehL + MinGap + rnd1 \cdot axmult$ com $rnd1$ normalmente distribuído $N(0,5, 0,15)$.

- abx : Distância mínima de seguimento desejada que é função de ax , uma distância delta de segurança bx e a velocidade com $abx := ax + bx \cdot v$.
- $sdv(v)$: Ponto de ação onde um motorista observa conscientemente que ele se aproxima de um carro mais lento. sdv aumenta com diferenças de velocidade crescentes v . No trabalho original de Wiedemann (1974) um limiar adicional $cldv$ (velocidade delta de fechamento) é aplicado para modelar desaceleração adicional pelo uso dos freios com uma variação maior que sdv .
- $opdv(v)$: Ponto de ação onde o motorista seguinte percebe que está mais lento que o veículo da frente e começa a acelerar novamente. A variação de $opdv$ é grande em comparação com $cldv$
- $sdx(v)$: Limiar de percepção para modelar a distância máxima de seguimento que é cerca de 1,5–2,5 vezes ABX .

2.1.2. Modelo de aceitação de brechas (gap acceptance)

O modelo de aceitação de brechas está associado à tomada de decisão de um veículo que está em uma via secundária e deseja entrar em um fluxo da via principal ou atravessá-la. A modelagem desse tipo de eventos resulta em conflitos que podem ser de alta velocidade dependendo da diferença entre os tipos de via que se está modelando (CUNTO; LOUREIRO, 2011).

A modelagem das interseções tem por objetivo representar as formações e dissoluções das filas formadas nas vias secundárias das aproximações. Quando a interseção não é semaforizada, há a dependência da aceitação de brechas da via principal para o cruzamento dos veículos da via secundária. Esse processo de decisão varia de acordo com a percepção de cada motorista e do tipo de manobra que se deseja realizar (ARAÚJO; CASTRO-NETO, 2018).

A aceitação de brechas impacta diretamente na estimativa das medidas de desempenho e de capacidade das aproximações secundárias e a sua modelagem é a principal etapa da representação do tráfego para essas vias. Se o tráfego é baixo, tende a ter *headways* mais aleatórios, por outro lado, quando o volume de tráfego está mais próximo da capacidade da via, as chegadas são mais constantes, já que os veículos estão trafegando de forma mais homogênea (ARAÚJO, 2018).

2.1.3. Modelo de mudança de faixa (*lane changing*)

O modelo para mudanças de faixa de tráfego na microssimulação utiliza um processo de decisão que leva em consideração o desejo de mudar de faixa, seja para acessar outro link através dos arcos, seja devido a obstruções na via ou veículos lentos na faixa atual. A partir da motivação para a troca de faixa, o processo de mudança irá agir de maneira semelhante ao modelo de aceitação de brechas (CUNTO; LOUREIRO, 2011).

Se o motorista não está ciente de qualquer mudança de faixa necessária para seguir a sua rota, ou seja, a próxima interseção relevante está distante, ele escolhe a faixa com a melhor situação de interação. Nesse caso são realizados três testes: Primeiro o desejo do motorista de trocar de faixa, nesse caso o modelo de interação deve ser diferente de livre. Segundo o motorista verifica nas faixas vizinhas se há situações de melhor interação com o fluxo livre ou com maior tempo de colisão (Maior intervalo de tempo para alcançar o AX do modelo de car-following). Terceiro, se é possível uma mudança de faixa considerando os veículos que vem atrás na faixa para onde há o desejo de ir (BARCELÓ, 2010).

Porém, na maioria das vezes, a mudança de faixa se dará pela necessidade de se acessar um conector da rota preestabelecida. O motorista tomará conhecimento da necessidade de mudar de faixa a certa distância que pode variar de 100 a 500 metros. A partir desse ponto, ele considera o conector na seleção da faixa. Porém, caso não consiga alcançar a faixa necessária para acessar o conector, o motorista poderá parar o veículo a uma distância denominada como distância de parada de emergência (BARCELÓ, 2010).

Com o entendimento das motivações dos condutores compreendida, faz-se também necessário observar os impactos ambientais relacionados ao fluxo veicular em escala microscópica. Neste sentido, são apresentados os principais poluentes atmosféricos da atividade veicular em trecho urbano a seguir.

2.2. EMISSÃO DE POLUENTES

A maior parte dos poluentes atmosféricos nas áreas urbanas, são provenientes dos veículos automotores, no Brasil, que é o quarto maior produtor de veículos automotores, há uma falta de detalhamento sobre os poluentes. Os impactos

para a saúde humana e para o meio ambiente são maiores nos grandes centros devido à alta concentração de veículos (VIEIRA, 2021).

No mundo, o setor de transportes, é responsável por um quarto das emissões de dióxido de carbono (CO₂), sendo que no Brasil, esse setor é responsável por quase a metade da emissão de dióxido de carbono. Devido a matriz de transportes brasileira ser predominantemente rodoviária, algo em torno de 95%, esse modo de transporte requer uma atenção especial do ponto de vista de emissão de poluentes (OLIVEIRA, 2021).

Elaborar políticas públicas que estabeleçam controles de emissão de poluentes tem se tornado um desafio para os grandes centros urbanos, por esse motivo, conhecer a frota veicular e sua distribuição no espaço ao longo do tempo, são fundamentais para a elaboração de medidas mitigadoras. Esse controle efetivo é fundamental para a gestão da qualidade do ar e conseqüentemente para a saúde ambiental (MAES, 2020).

Os níveis de poluição atmosférica são determinados pela resolução número 491 de 19/11/2018 do CONAMA (BRASIL, 2018), onde tem-se que “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”.

Com relação a origem do poluente, pode-se dividi-los em primário e secundário. Os poluentes primários são encontrados na atmosfera com a mesma composição que foi emitida por suas fontes. Já os poluentes secundários, são encontrados depois de passar por uma reação química com outro poluente ou com outra substância (CETESB, 2020).

A qualidade do ar varia de acordo com a presença de determinados índices de concentração de poluentes, que podem sofrer alterações devido a condições climáticas, determinando uma maior ou menor concentração na atmosfera. Por esse motivo a qualidade do ar pode piorar ou melhorar mesmo que a fonte poluidora não tenha alterado a sua taxa de emissão de poluente (CETESB, 2020).

Os principais poluentes que são emitidos por veículos a combustão são o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO₂), os hidrocarbonetos (HC) e os materiais particulados (MP). Esses poluentes causam

diversos problemas para a saúde humana, doenças respiratórias, câncer de pulmão, doenças vasculares e neurológicas entre outros (VASQUES; HOINASKI, 2019).

2.2.1 – Óxidos de carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro, resultante da queima incompleta de combustíveis de origem orgânica com o oxigênio da atmosfera, conforme a equação 8. Esse gás é extremamente tóxico em altas concentrações pois ele reage com a hemoglobina do sangue reduzindo a capacidade de transportar oxigênio podendo causar a morte por hipóxia (QUIRINO, 2020).



Os sintomas mais comuns de uma intoxicação inicial por monóxido de carbono são dores de cabeça e no peito, tontura, confusão, náuseas e vômitos. A exposição constante ao monóxido de carbono pode ter graves consequências, principalmente em pessoas do grupo de risco que são idosos, crianças e gestantes, nesse grupo o monóxido de carbono pode causar perda das funções psicomotoras e doenças cardiovasculares (WEAVER, 2002).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, a principal fonte de emissão de monóxido de carbono é o veículo automotor leve, sendo responsável por mais de 70% da emissão desse gás na atmosfera. Embora, nas últimas décadas esse número venha em queda, há uma tendência de estabilização, pois essa queda está associada a modernização dos motores dos veículos e não a redução de uso dos mesmos (BRASIL, 2011).

O dióxido de carbono é o principal produto da combustão completa dos motores alimentados por combustível fóssil, conforme as equações 9 e 10. A preocupação com o aquecimento global levou ao aumento do controle desse gás devido a sua capacidade de absorver a luz infravermelha emitida pelo sol, contribuindo com o efeito estufa (DIAS, 2018)(JACONDINO, 2005).

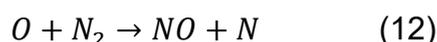


Visando a redução dos gases de efeito estufa foi assinado o Tratado de Kyoto, que instituiu a compra e venda de créditos de carbono entre países. Com isso o crescimento de algumas nações não foi comprometido na tentativa de atingir as metas estabelecidas para a redução dos gases de efeito estufa, logo é necessário que as estimativas de emissões estejam corretas.

2.2.2 – Óxidos de nitrogênio (NO)

O Óxido Nítrico (NO), um gás incolor e inodoro, e o Dióxido de Nitrogênio (NO₂), um gás de cor castanho avermelhada, são chamados de NO_x. Esses gases são produtos da combustão incompleta no motor, onde representam as principais fontes de emissões desses óxidos (BRANDÃO, 2020).

Os óxidos de nitrogênio são conhecidos poluidores, sendo um dos responsáveis pela chuva ácida, pela redução da camada de ozônio e pela formação de oxidantes fotoquímicos. O NO_x, na combustão, se forma basicamente, pela reação do oxigênio com o nitrogênio do ar ou pela reação do oxigênio com o nitrogênio dos combustíveis, conforme as equações 11 e 12 (VERGNHANINI FILHO, 2016).



Nas grandes cidades, os veículos são os principais emissores dos óxidos de nitrogênio, principalmente os veículos pesados, que correspondem por 55% do total dessas emissões. No organismo, os óxidos de nitrogênio prejudicam à saúde, atacando as vias aéreas, aumentando a sensibilidade à asma e à bronquite, irritando os pulmões e reduzindo a resistência a infecções respiratórias (CETESB,2020).

2.2.3 – Dióxido de enxofre (SO₂)

O dióxido de enxofre é resultado da queima de combustíveis que possuem enxofre na sua formulação, como a gasolina e o óleo diesel, assim como os óxidos de nitrogênio, contribuem para a formação das chuvas ácidas. Na atmosfera, em reação

com outras substâncias, forma partículas de sulfato, que são responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera (CETESB, 2020).

Essa substância, ao entrar no corpo humano, reage com a água e forma o ácido sulfuroso ou o ácido sulfúrico, que, ao longo do tempo, lesiona o aparelho mucociliar que é uma das defesas do pulmão provocando uma traqueo-bronquite. Com o passar do tempo, essa doença pode se tornar irreversível e desencadear infecções respiratórias, pois houve um comprometimento severo no sistema de defesa do organismo (SIMON, 2003).

2.2.4 – Hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos são compostos formados por cadeias de carbono e hidrogênio, eles podem se apresentar na forma gasosa, partículas finas ou gotas (BRASIL, 2011). São expelidos pelo motor a partir da queima incompleta do combustível ou na forma de vapor durante o processo de abastecimento, por exemplo (CETESB, 2020).

Esses elementos, combinado aos óxidos de nitrogênio, merecem uma atenção especial, pois, ao reagir na atmosfera, formam os “smog”, que são as névoas de poluição visíveis nos grandes centros urbanos. Os hidrocarbonetos além do efeito estufa, causa prejuízos à saúde, ocasionando problemas pulmonares e no sistema respiratório (CETESB, 2020).

2.2.5 – Material particulado

Os materiais particulados são um conjunto de poluentes constituído de poeira, partículas sólidas e líquidas além das fumaças que se mantêm suspensos no ar devido ao seu pequeno tamanho. Esse material é resultado da queima dos combustíveis dos motores dos veículos, principalmente dos motores a diesel (BRASIL, 2011).

O tamanho das partículas está ligado ao seu potencial de causar problemas de saúde, pois quanto menor, maior a facilidade que esse material tem de chegar aos pulmões. Além disso, essas emissões causam grande desconforto aos pedestres próximos a via devido a cor e o mau cheiro da fuligem, ainda podendo causar acidentes devido a redução da visibilidade (CETESB, 2020).

O material particulado pode ser dividido em muitas frações como Partículas Totais em Suspensão (PTS), MP_{10} e $MP_{2,5}$. As Partículas Totais Suspensas possuem diâmetro de até 35 μm , o MP_{10} é o material particulado com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 μm e o $MP_{2,5}$ é o material particulado com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 μm (BRANDÃO, 2020).

Tais partículas são originárias principalmente do diesel e consistem em um núcleo de carbono onde aderem vários compostos orgânicos e óxidos. Os veículos do ciclo diesel podem atingir taxas de liberação de material particulado de 50 a 100 vezes maior que os veículos do ciclo Otto, devido à combustão incompleta do combustível (DIAS, 2018).

A queima de combustíveis fósseis promove a emissão de partículas como os *black carbon*, materiais orgânicos diversos, sulfatos, metais e cinzas volantes. A fuligem e o sulfato contribuem com partículas menores, enquanto materiais orgânicos, como combustíveis não queimados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) podem ser encontrados tanto em partículas maiores quanto em menores (BRITO *et al.*, 2018).

A capacidade de penetração do material particulado no corpo humano é maior quanto menor for o diâmetro da partícula. O MP_{10} , por exemplo, pode passar pelas cavidades nasais e bucais e chegar na laringe. Vários estudos buscaram relações entre o aumento do número de internações por doenças respiratórias e cardiovasculares e os níveis elevados de MP_{10} (BRITO *et al.*, 2018).

2.3. MODELAGEM DINÂMICA DE EMISSÃO DE POLUENTES

As emissões de poluentes no transporte têm gerado uma preocupação nos últimos anos e, conseqüentemente, causado o interesse de muitos pesquisadores sobre o tema. Tais emissões variam devido a diversos fatores, entre os quais incluem: o comportamento do motorista, as condições do trânsito e as características da via (ANYA, 2013).

A preocupação com a qualidade do ar, visto que o transporte é um grande emissor dos gases poluentes se tornou um tema social relevante. Para estudar essas questões, existem diversos modelos de emissão associados a modelos de simulação

de tráfego, sendo que, cada modelo apresenta suas particularidades, por isso é muito importante selecionar o modelo apropriado ao tipo de veículo em estudo (DIAS, 2014).

Neste sentido, faz-se necessário o conhecimento da lógica dos modelos de emissão integrados aos modelos de simulação, para uma correta avaliação dos resultados da modelagem, pois a avaliação incorreta dos resultados pode acarretar na implementação de medidas públicas inaccuradas ou insuficientes para o cenário real, tendo em vista que há uma dissonância entre o real e o simulado (JACONDINO, 2005).

A maioria dos modelos de tráfego apresentam módulos de estimativa de emissão de poluentes, porém essas estimativas apresentam grandes variações. Os modelos de carro seguidor (*car-following*) e de mudanças de faixa (*lane changing*) são os grandes responsáveis pelas variações das estimativas, pois alguns modelos geram uma aceleração instantânea maior, o que impacta diretamente no consumo de combustível e nas emissões veiculares (IMASATO et al. 2007).

Alguns modelos de emissão de poluentes podem ser integrados a modelos de macrossimulação de tráfego, como é o caso do MOBILE e do MOVES, pois esses modelos têm a capacidade de estimar as emissões em larga escala. Por outro lado, os modelos MODEM, EnVIVER e CMEM, são utilizados por muitos estudos para a calibração de modelos de microsimulação, além da avaliação de estratégias de sistemas inteligentes de transportes (ITS)(DIAS, 2014).

2.4. MODELAGEM UTILIZANDO O SOFTWARE VISSIM E ENVIVER

Para a modelagem proposta neste trabalho, o software aplicado foi o VISSIM, em função de suas capacidades de modelagem em microescala do tráfego e integração a um modelo de emissão no estado da arte. Na versão VISSIM 2022, da empresa alemã PTV, traduzindo livremente, VISSIM é derivado de *tráfego nas cidades – modelo de simulação*. Esse software tem aplicabilidade em vários cenários na engenharia de tráfego, como no planejamento de trânsito, no tempo de sinalização semaforica, na simulação de evacuação de pessoas e no planejamento de redes de transportes (PTV, 2022)

Segundo a PTV (2015), o VISSIM é líder em microsimulação para processos multimodais, ele é baseado no comportamento dos condutores e orientado em intervalos de tempo. O VISSIM faz parte de um conjunto de softwares que inclui

software de macrossimulação, simulação de tráfego de pedestres, análise de dados de acidentes de trânsito, ferramentas de gerenciamento de tráfego entre outros.

A modelagem da rede no VISSIM é feita a partir do próprio software, com ferramentas próprias, os volumes de tráfego, as rotas dos veículos e a distribuição modal, também são criadas dentro do próprio VISSIM (NORONHA, 2019). O fluxo de veículos é simulado por distribuição espacial e se movimentam na rede de acordo com os conceitos de *car-following* (carro seguidor) e troca de faixas (*lane-changing*) e o parâmetro de τ , aceitação de brechas (*gap*) (AYALA, 2013).

No VISSIM, os algoritmos de representação de tráfego, são os modelos propostos por WIEDEMANN (1974) e WIEDEMANN (1991), onde são combinados os modelos de desempenho de tráfego com os modelos comportamentais dos motoristas (LACERDA, 2016). Devido ao caráter urbano da área em estudo, foi utilizado o modelo de WIEDEMANN 74 por ser o que melhor se adapta para fluxos urbanos e com interrupções.

Um modelo de emissão dedicado, VERSIT+micro, foi desenvolvido com base no modelo VERSIT+ para calcular as emissões dos veículos com base na microsimulação de tráfego. Esse modelo foi desenvolvido pela empresa holandesa *Netherlands Organization of Applied Scientific Research* (TNO) e é capaz de calcular valores de CO₂, NO_x e Material Particulado dependendo do tipo de veículo que está sendo considerado no estudo (TNO, 2022).

Para calcular o valor estimado, as emissões são expressas como uma função dada pela equação (13).

$$E_{trans} = E_{QS} + P_{Rated} \cdot F_{trans} \quad (13)$$

Onde:

- E_{trans} é o valor das emissões no regime transiente (g/h);
- E_{QS} é o valor das emissões no regime permanente (g/h);
- P_{radet} é o valor da potência do motor;
- F_{trans} é a função de correção dinâmica (g/h/kw);

A função correção dinâmica F_{trans} , foi desenvolvida devido a diferença dos valores de emissões observados experimentalmente e a análise das emissões, logo, a correção dinâmica pode ser expressa pela equação 14.

$$F_{trans} = -1,06.T_1 - 0,534.T_2 + 5,57.T_3 \quad (14)$$

Onde T_1 , T_2 e T_3 são parâmetros transientes específicos para cada tipo de poluente conforme tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 - Fatores transientes para a correção de NOx

NO _x	T ₁	T ₂	T ₃
Euro 0	0,18	-0,29	-1,8
Euro 1	0,15	-0,3	-1,99
Euro 2	0,15	-0,3	-1,99
Euro 3	1,05	-0,29	-1,49
Euro 4	1,05	-0,29	-1,49
Euro 5	1,05	-0,29	-1,49

Tabela 2 - Fatores transientes para a correção de CO

CO	T ₁	T ₂	T ₃
Euro 0	3,98	0,38	-0,1
Euro 1	3,98	0,38	-0,1
Euro 2	3,98	0,38	-0,1
Euro 3	3,19	0,24	-0,09
Euro 4	3,19	0,24	-0,09
Euro 5	3,19	0,24	-0,09

Tabela 3 - Fatores transientes para a correção de Material Particulado

MP	T ₁	T ₂	T ₃
Euro 0	0,53	-0,02	0,44
Euro 1	0,53	-0,02	0,44
Euro 2	0,53	-0,02	0,44
Euro 3	0,14	-0,01	-0,58
Euro 4	0	0	0

Euro 5

0

0

0

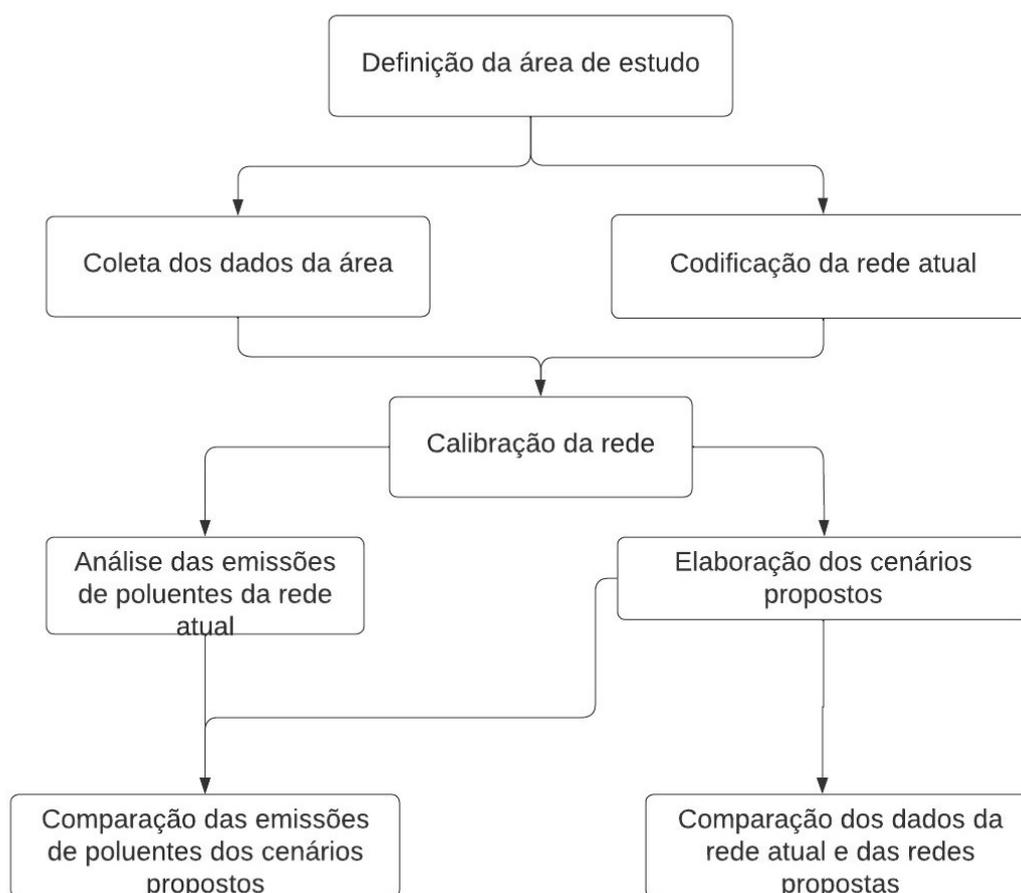
Segundo a TNO (2022), a *Organization for Applied Scientific Research* localizada em Delft, na Holanda, é um dos principais institutos de pesquisa de mobilidade sustentável e uma das principais atividades das últimas três décadas é a medição e modelagem das emissões veiculares. Os dados de emissões são coletados em um banco de dados e usados para desenvolver modelos avançados de emissões para todas as classes de veículos disponíveis.

Tendo em vista os modelos e conceitos apresentados na fundamentação teórica, no capítulo a seguir é apresentado o método utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho.

3. METODOLOGIA

A metodologia para alcançar os objetivos deste trabalho foi, primeiramente, uma revisão bibliográfica sobre congestionamentos, impactos ambientais causados pelos congestionamentos e o uso de simuladores de tráfego como forma de modelagem de cenários. Para ser possível alcançar os objetivos propostos, esse trabalho comparou o cenário real codificado e calibrado utilizando o software VISSIM, com os cenários propostos utilizando as mesmas condições de tráfego do cenário base. Na figura 4, é apresentado o fluxograma das etapas da metodologia utilizada.

Figura 4 - Fluxograma das etapas do método



Fonte: Autor

3.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A definição do local de estudo está diretamente ligada à dificuldade de se obter os dados necessários para a construção do trabalho, ao interesse público, à relevância e ao conhecimento do pesquisador do local observado. A área de estudo deve ter dimensões que permitam a análise dos parâmetros relevantes ao estudo, porém não deve ser extrapolado a ponto de se perder a relevância dos dados coletados.

Na região observada, deve ser possível obter os dados que serão inseridos na simulação de tráfego como tempos semaforicos, áreas de estacionamento, linhas de transporte público, movimentos permitidos e proibidos nas aproximações (regras de circulação), largura e quantidade das faixas e os volumes de tráfego. Os dados de tempo semaforico e volumes de tráfego, normalmente, podem ser obtidos com o órgão com circunscrição sobre a via. Os demais dados podem ser obtidos por inspeção visual ou por meios digitais, como os disponibilizados e/ou publicizados na internet.

3.2. CODIFICAÇÃO DA REDE DE ESTUDO

A codificação da rede de estudo é importante para uma correta interpretação dos dados obtidos nos cenários base e propostos. Os links representam as ruas e avenidas da rede e os conectores, os movimentos permitidos a partir de cada link (DNIT, 2006). A cada link podem ser atribuídas características próprias como quantidade de faixas, larguras das faixas, velocidades permitidas e se alguma faixa é exclusiva para algum tipo de veículo. No caso em estudo, há faixas exclusivas para o transporte público, além de faixas onde a realização de um determinado movimento (conversão ou seguir em frente) são obrigatórios.

As medidas de largura de cada via, largura de faixas e tamanho das áreas de estacionamento, foram obtidas com o auxílio da ferramenta de medição do Google Maps. Os movimentos permitidos e proibidos foram obtidos a partir de análise visual das vias, assim como pontos de parada de transporte público e área de estacionamento.

3.3. CALIBRAÇÃO DA REDE

A calibração da rede consiste na fase de aproximar o trecho codificado no simulador com a realidade observada na via. A acurácia de um simulador reside em sua capacidade de reproduzir a rede com uma margem de erro aceitável. Neste trabalho, a calibração foi realizada a partir dos tempos de viagem coletados em campo. Em função de limitações de recursos para uma amostra maior, foram realizadas cinco coletas de tempos para cada movimento das aproximações, em dias típicos, dentro da hora-pico da tarde, entre 18 e 19 horas, e calculada a média aritmética dos tempos obtidos em cada passada, a partir de determinado ponto. Essa média foi comparada com a média de tempo das simulações nos mesmos trechos, a partir do mesmo ponto onde foi iniciada a coleta em campo.

Para a calibração da rede, com os tempos de viagem utilizados a partir da simulação, foi construída a média aritmética das dez rodadas da simulação, com as dez sementes aleatórias diferentes entre si (HOLLANDER E LIU, 2008). Com isso, teremos a comparação dos dez cenários simulados, ou seja dez sementes aleatórias distintas, com as cinco passagens por movimento da interseção que foram coletadas em campo. Para esse trabalho, foi considerada dentro da margem de erro, a variação de dez por cento nos tempos de viagens (VILARINHO, 2008) (BETHONICO, 2016).

Em geral, quando um analista escolhe um conjunto de parâmetros de calibração, a tarefa ambiciosa é escolher um número de parâmetros que seja grande o suficiente para cobrir os vários elementos comportamentais do modelo, mas pequeno o suficiente para permitir prestar atenção individual ao valor de cada parâmetro. Alguns métodos de calibração são parciais ou totalmente manuais, esse tipo de calibração permite que seja realizada em apenas um local por vez. A calibração manual deve ser considerada apenas se a rede for de escala limitada, onde o procedimento automático pode não ser sensível o suficiente aos fundamentos comportamentais (HOLLANDER E LIU, 2008). Nesse trabalho foi realizada a calibração manual, sendo observados os parâmetros que influenciam na variabilidade do tempo de viagem. Nesse caso, a distância de mudança de faixa para acessar um conector da rede foi o parâmetro que teve a maior influência na variabilidade dos tempos de viagem.

3.5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

O processo de estimativa das emissões veiculares é complexo pois é derivado de diversos fatores. Desde a característica da infraestrutura viária, até o tipo de veículo e combustível podem interferir na análise das emissões. As estimativas podem ser realizadas em diferentes níveis de detalhamento, a depender do grau de agregação das variáveis consideradas. (IMASATO, 2008)

A análise das emissões ambientais foi realizada a partir da modelagem das emissões veiculares por meio do módulo integrado dinâmico de emissões. Os modelos são capazes de reproduzir redes de transportes em várias escalas espaciais, desde uma simples interseção até uma área que abrange uma região. A escolha da região de estudo depende do objetivo e da possibilidade de se obter dados, além do tempo computacional utilizado pelos modelos (JACONDINO, 2005).

Nos últimos 30 anos as emissões de mais de 20 mil carros e caminhões foram medidas e analisadas. Os dados de emissões são coletados em um banco de dados e usados para desenvolver modelos avançados de emissões para todas as classes de veículos disponíveis. As medições em laboratório, submetem os veículos a uma ampla variedade de condições. Simulando comportamentos reais como congestionamentos, rotatórias, condições normais de circulação e outros (TNO, 2022).

3.6. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Os cenários propostos foram elaborados visando melhorar a fluidez, reduzir os tempos de viagens, tamanho das filas e reavaliar parâmetros das emissões de poluentes atmosféricos causadas por veículos a combustão. A concepção dos cenários foi constituída a partir da análise dos parâmetros obtidos na simulação de tráfego, visando a otimização da infraestrutura do local. As imagens dos cenários propostos pode ser encontrada na seção 4.6 desse trabalho, onde será detalhado os resultados obtidos.

- Cenário 1: Consiste em um projeto da Prefeitura de Joinville para o trecho analisado, que ainda não foi implementado. A ideia dessa proposta é alterar o cruzamento da Rua Ministro Calógeras, da quadra entre as ruas Getúlio Vargas e do Príncipe para a continuação da Rua Ministro Calógeras, da quadra entre a

rua Getúlio Vargas e a Travessa São José. Atualmente, na faixa central da via, há um tempo semafórico exclusivo para esse movimento com a sinalização da placa de regulamentação R-26 – Siga em frente.

- Cenário 2: Tem por base o procedimento operacional do Departamento de Trânsito de Joinville (Detrans) em situações de emergência. Nesse cenário, os movimentos a esquerda e o movimento de seguir em frente da Rua Ministro Calógeras são proibidos, sendo obrigatória a conversão a direita em ambos os lados da Rua Ministro Calógeras. O processo de proibição, via de regra, se deve a pane semafórica ou falta de luz no local, e é executado por agentes de trânsito com a colocação de cones e barreiras que redirecionam os fluxos do cruzamento.
- Cenário 3: Esse cenário consiste na reprogramação semafórica a partir do método de Webster. É calculado o tempo de ciclo mínimo e ótimo para o local e redistribuído os tempos de acordo com o método. Não há nenhuma alteração de volumes de tráfego ou restrições de movimentos.
- Cenário 4: Nesse cenário, a alternativa encontrada é a manutenção do movimento de seguir em frente da rua Ministro Calógeras, porém é proibida a conversão à esquerda da mesma rua no sentido Oeste – Centro, obrigando os veículos a realizar a conversão a direita.
- Cenário 5: Nesse cenário, a única alteração proposta é a implementação de um serviço de transporte público seletivo, com micro-ônibus onde é proibido o transporte de passageiros em pé, com poltronas padrão executivo, ar-condicionado e wi-fi a bordo. A ideia é que esse serviço seja capaz de captar pelo menos dez por cento dos usuários do transporte individual, ou seja, há uma queda de dez por cento nos fluxos do cruzamento como um todo.

3.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES

A partir dos cenários propostos, foi realizada a comparação dos parâmetros de comprimento de fila, atraso total da rede e tempo de viagem. Nessa etapa foram analisados os ganhos de cada alteração ou modificação, sendo possível, através do uso do VISSIM, a obtenção dos dados necessários para esses confrontos.

3.8. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES

A partir das saídas do EnViver, foram analisados os parâmetros de velocidade média, concentração de CO₂, NO_x e Material Particulado, além das emissões totais dos mesmos poluentes. A comparação foi feita diretamente do cenário base com os cenários propostos, sendo analisadas as alterações dos dados obtidos.

A análise de cada poluente deu-se pela verificação do percentual da variação da quantidade total de emissão, pela quantidade de emissão por hora e por quilômetro. A partir da análise de cada poluente, foi possível determinar qual cenário apresenta o melhor resultado do ponto de vista ambiental.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os principais dados obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo anterior. As análises serão apresentadas seguindo o modelo apresentado anteriormente.

4.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo definida neste trabalho foi selecionada devido ao alto volume de tráfego na região, pois a área escolhida é o principal acesso da região sul à área central da cidade de Joinville, o que gera constantes congestionamentos, principalmente nos horários de pico. Também há a presença de polos geradores de tráfego como a escola Santos Anjos, a Universidade da região de Joinville (Univille) e o hospital municipal São José nas proximidades. O semáforo existente no cruzamento, atualmente, possui quatro tempos, sendo que um deles é dedicado exclusivamente para a travessia de pedestres e mais três tempos para os movimentos conflitantes do cruzamento.

Os dados para o estudo do local, foram obtidos pelo Relatório de Movimentos em Interseção, elaborado nos dias 10, 11 e 12 de março de 2020, disponibilizado pela Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável (SEPUD) e os tempos semafóricos foram disponibilizados pelo setor de Sinalização do Detrans ambos pertencentes à estrutura administrativa da Prefeitura de Joinville.

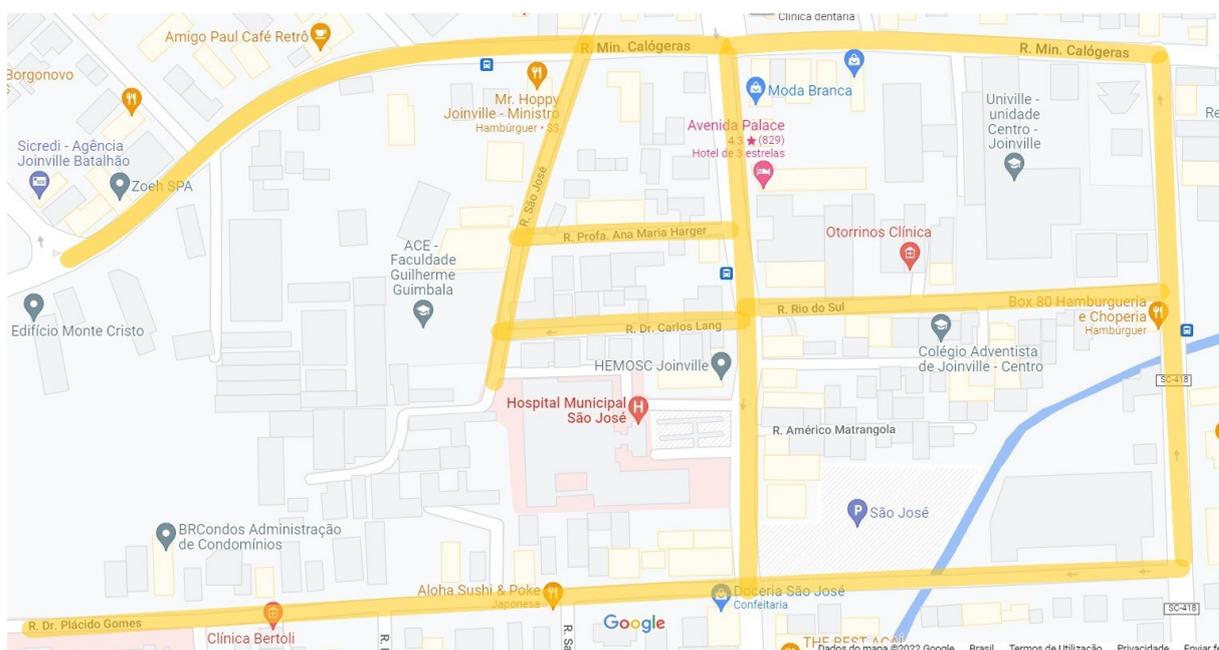
Para a análise mais robusta dos movimentos conflitantes, a região de estudo foi expandida para além do cruzamento da rua Getúlio Vargas e Avenida Juscelino Kubitschek com a rua Ministro Calógeras. Estendendo a análise para o trecho inicial da rua São Paulo, rua Rio do Sul e rua Plácido Gomes. Essas vias são importantes nas análises dos cenários propostos e estão destacadas nas imagens das Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Mapa e croqui do local de estudo



Fonte: Relatório de movimento em interseção

Figura 6 - Extensão da área de estudo



Fonte: Google Maps (Adaptado)

4.2. CODIFICAÇÃO DA REDE DE ESTUDO

A codificação da rede no software VISSIM, foi uma importante etapa para a análise dos resultados, pois uma codificação incorreta acarretaria resultados inacurados no ambiente de simulação. Para a codificação da via, foi utilizado o Google

Maps visando a obtenção dos dados de largura das faixas de tráfego, tamanho das áreas de estacionamento, posicionamento das faixas de pedestres e outros parâmetros geométricos da via.

Na codificação foram utilizados os dados obtidos de volume total de tráfego do cruzamento (Tabela 4) e tempos do semáforo (Quadro 1), além disso foram inseridos os horários dos ônibus do transporte público que estão presentes na simulação. Os dados simulados são do período entre as 18 e 19 horas. O resultado da codificação e o diagrama de tempos do semáforo do cruzamento em estudo estão representados nas figuras 7 e 8.

Tabela 4 - Volume total de tráfego no cruzamento

	Tráfego Total			
	Motocicletas	Carros	Ônibus	Caminhões
Rua Ministro Calógeras Oeste	114	548	3	665
Rua Ministro Calógeras Leste	310	1344	12	1666
Avenida JK	289	1254	7	1550

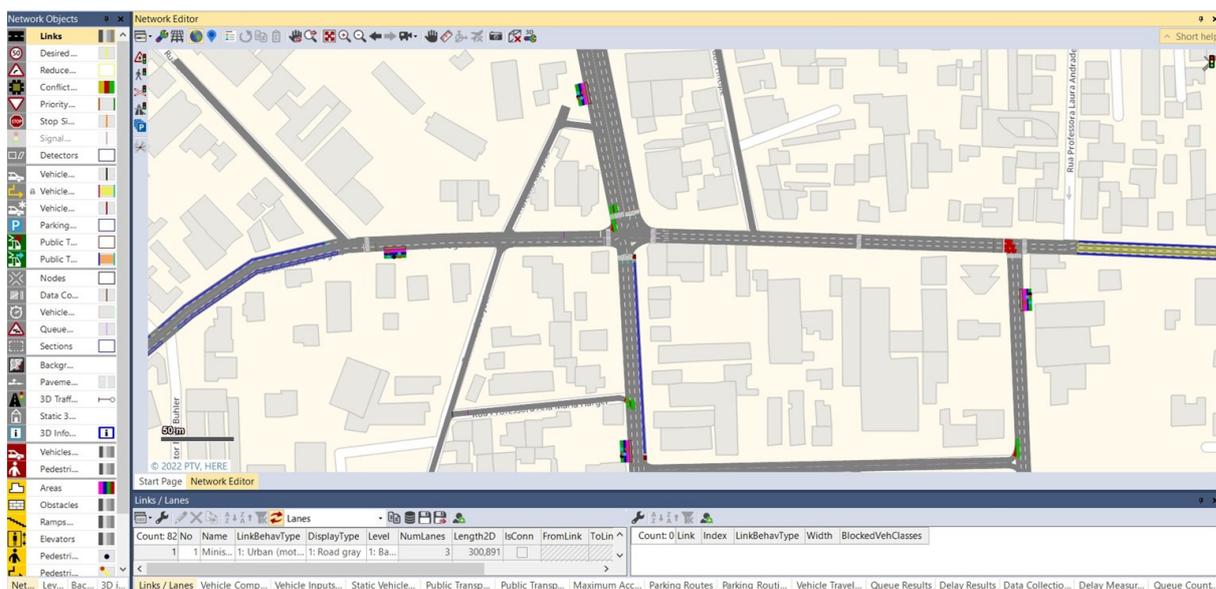
Fonte: Relatório de Movimento em Interseção – Prefeitura de Joinville (Adaptado)

Quadro 1 - Programação semafórica rua Ministro Calógeras cruzamento rua Getúlio Vargas e Avenida JK

	Sentidos Permitidos (verde)	Tempo de verde (s)
Estágio 1	Veicular JK (sentido sul) + Veicular Ministro Calógeras Leste (Apenas conversão à direita)	40
Estágio 2	Veicular Ministro Calógeras Leste (sentido batalhão) + Pedestre JK (até canteiro central) + Veicular Ministro Calógeras Leste (conversão Getúlio Vargas)	18
Estágio 3	Veicular Ministro Calógeras Oeste + Pedestre JK (até canteiro central) + Veicular Ministro Calógeras Leste (conversão à esquerda)	16
Estágio 4	Pedestre geral	10

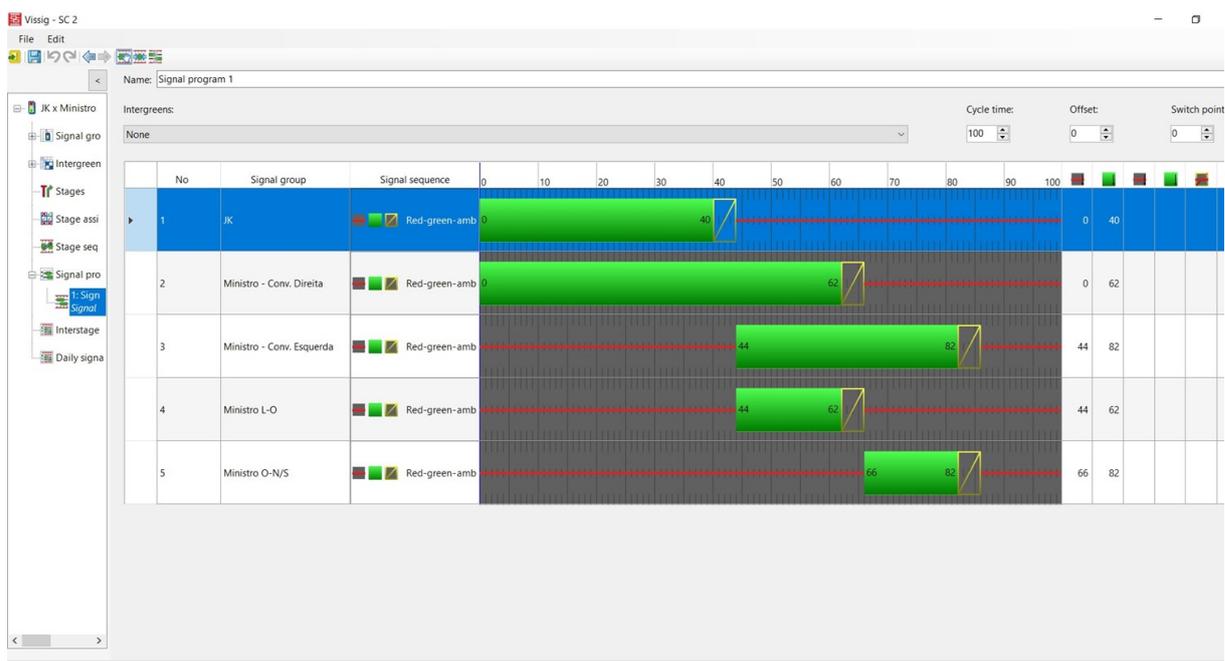
Fonte: Setor de Sinalização – Detrans (Adaptado)

Figura 7 - Codificação da rede no VISSIM



Fonte: Autor

Figura 8 - Tempo semafórico



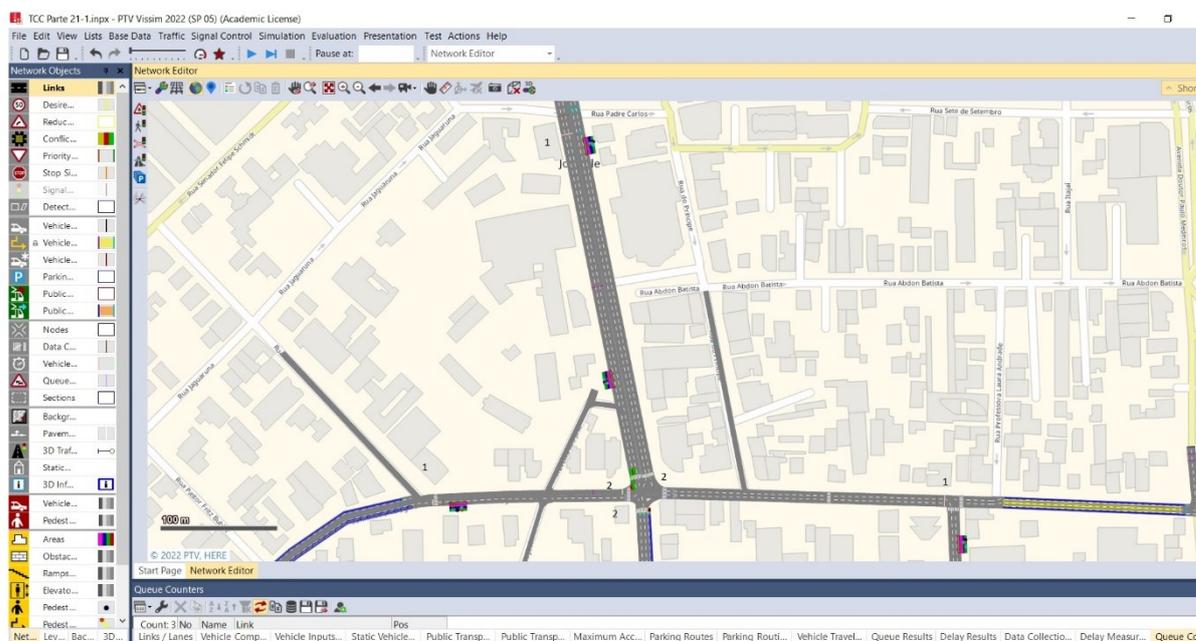
Fonte: autor

4.3. CALIBRAÇÃO DA REDE

A partir da codificação da rede, a calibração foi realizada considerando os tempos de viagem entre dois pontos de cada percurso da rede simulada. Por questões operacionais, as coletas de tempo em cada movimento, foi realizada com apenas um veículo, intitulado veículo probe ou veículo sonda. Essa coleta de tempo foram entre

as 18 e 19 horas de um dia típico tendo em vista que a simulação foi codificada com as demandas desse mesmo horário. Os pontos de início e fim da coleta dos tempos estão indicados, pelos números 1 e 2 respectivamente, na figura 9.

Figura 9 - Pontos de início e fim das medições de tempo



Fonte: Autor

Na tabela 5, estão os dados coletados em campo, onde cada coluna representa um conjunto de passagens nos trechos amostrados. Por questões técnicas, o movimento da Avenida JK sentido Rua Getúlio Vargas, ficou com uma passada extra que não foi descartada, logo, nessa aproximação a média foi calculada dividindo a soma dos valores obtidos por seis.

Tabela 5 - Tempos coletados na aproximação (s)

	04/11/2021	09/12/2021	09/12/2021	09/12/2021	17/03/2022	17/03/2022
JK - Getúlio	108	94	150	64	37	37
Ministro L – Ministro O	185	385	189		360	380
Ministro L - JK	65	68	65		104	86
Ministro L - Getúlio	44	46	50		56	42
Ministro O -	80	102	83		126	195

JK					
Ministro O -	92	124	90	88	263
Getulio					

Fonte: Autor

Após as coletas dos dados, foi calculada a média de cada movimento do cruzamento. Para o cálculo dos movimentos partindo da Avenida JK, tanto em direção a rua Ministro Calógeras Oeste quanto para a rua Getúlio Vargas, foi utilizado o mesmo tempo, pois a aproximação se dá na mesma condição de tráfego. Na tabela 6, são apresentados os tempos médios coletados.

Tabela 6 - Média dos tempos nas aproximações (s)

	Média
Ministro Leste → JK	78,2
Ministro Leste → Ministro Oeste	299,8
Ministro Leste → Getúlio	47,6
Ministro Oeste → Getúlio	131,4
Ministro Oeste → JK	117,2
JK → Getúlio	56,67
JK → Ministro Oeste	56,67

Fonte: Autor

Na sequência, foram gerados dez cenários na simulação, com dez sementes aleatórias diferentes, visando a coleta das médias dos tempos nas aproximações conforme descrito na metodologia do capítulo anterior. A partir desse momento, foram feitos os ajustes no comportamento dos usuários na simulação a fim de tornar o comportamento simulado o mais próximo possível do comportamento real observado em campo.

Os principais parâmetros dos ajustes comportamentais foram os analisados no capítulo 2. O fator que reduziu o erro da simulação de maneira mais substancial foram os parâmetros de lane change. Com o aumento da distância para que ocorra a troca de faixa, visando realizar uma conversão, os veículos se tornaram menos agressivos e formaram os comboios observados em campo.

Também foi ajustada a parada de emergência (Emergency stop position) que por padrão é de 5 metros e nesse trabalho foi convencionado em 50 metros. Esse

valor foi escolhido devido a proibição de mudança de faixa nas proximidades do cruzamento conforme o código de trânsito brasileiro que proíbe a mudança de faixa quando há linha branca contínua e tachões nas proximidades de cruzamentos.

Nesse trabalho foi realizada a calibração visual, que consiste em analisar comportamentos incomuns na simulação que não ocorrem no cenário real e calibração numérica com o cálculo das médias dos tempos de viagem comparando os valores obtidos nas passagens com os valores das saídas do simulador. Essas etapas foram sendo executadas a cada alteração no comportamento dos veículos da simulação até a obtenção de valores dentro da margem de erro tolerada conforme exposto na metodologia. Após o término da fase de calibração uma nova inspeção visual em toda a rede foi realizada para verificar a coerência do comportamento de forma geral na simulação. Ao final dos ajustes comportamentais, se obteve os dados apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Comparação entre tempos de viagem simulado e coletado em campo (s)

	Média da simulação	Média dos valores medidos em campo	Erro
Ministro Leste → JK	72,72	78,2	0,07
Ministro Leste → Ministro Oeste	272,08	299,8	0,09
Ministro Leste → Getúlio	49,53	47,6	0,04
Ministro Oeste → Getúlio	140,23	131,4	0,07
Ministro Oeste → JK	118,29	117,2	0,01
JK → Getúlio	61,54	56,67	0,09
JK → Ministro Oeste	60,18	56,67	0,06

Fonte: Autor

O software VISSIM é capaz de apresentar diversas medidas de desempenho de tráfego na simulação. Para tornar a análise mais objetiva, esse trabalho limitou os parâmetros de saída analisados. Portanto, foram utilizados os atrasos locais, atrasos da rede, tempos de viagem, tempo em fila, número de paradas e as velocidades médias aritméticas e médias harmônicas, conforme as tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	351,73	486,57
Ministro Calógeras Oeste	95,97	203,04
JK	71,3	221,89

Fonte: Autor

Tabela 9 - Dados de atrasos dos veículos

	Tempo médio de parada por veículo(s)	Número médio de paradas por veículo	Atraso médio por veículos(s)
Ministro Leste → JK	32,46	1,89	54,94
Ministro Leste → Ministro Oeste	212,29	4,48	253,13
Ministro Leste → Getúlio	22,43	0,8	31,63
Ministro Oeste → Getúlio	108,24	2,24	31,63
Ministro Oeste → JK	87,83	1,75	104,1
JK → Getúlio	27,29	1,01	37,9
JK → Ministro Oeste	27,28	1,14	38,16

Fonte: Autor

Tabela 10 - Tempo de filas (s) e velocidades (km/h)

	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	113,33	30,62	20,35
JK Sul → Centro	152,63	48,01	47,31
Ministro Oeste	10,31	42,66	32
Ministro sentido Batalhão	252,28	49,11	48,75
Getúlio Vargas	52,19	48,28	47,61

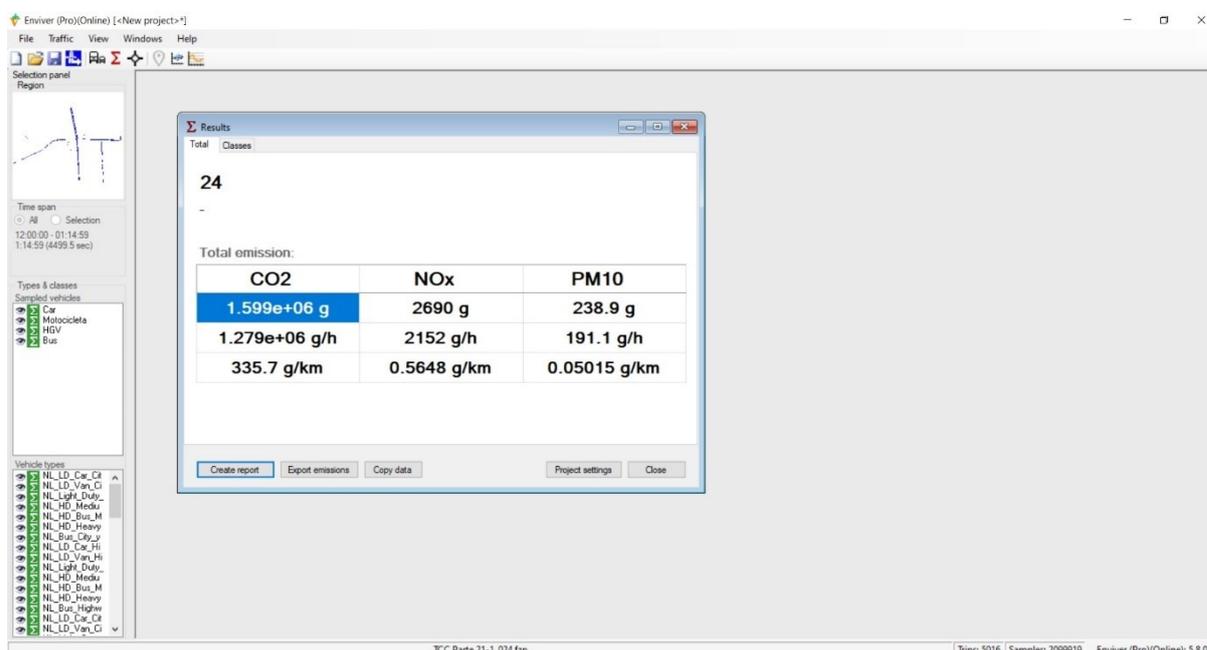
Fonte: Autor

Ao final da fase de calibração, os resultados obtidos no cenário simulado foram enviados para o software EnViver para a análise dos resultados das emissões de poluentes atmosféricos causados por veículos motorizados.

4.5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Para a análise das emissões, foi utilizado um cenário do VISSIM e inserido no EnViver o arquivo de texto para dados de fluxo de tráfego simulado (.fzp). Após a extração do arquivo, o EnViver abre, automaticamente, a aba “Vehicle-class assignments” que tem por objetivo determinar as classes dos veículos. Essas classes podem ser as classes padrão do EnViver, que são baseadas na composição média da frota holandesa ou o usuário pode criar as classes a partir de dados de frota veicular, sua composição e data de fabricação. Após a criação da classe veicular com a composição e idade da frota rodante, o EnViver apresenta a tabela de emissão de poluentes atmosféricos, mostrando as emissões de CO₂, NO_x e material particulado conforme a figura 10.

Figura 10 - Apresentação das emissões de poluentes atmosféricos



Fonte: Autor

No software EnViver, há a possibilidade de criar um relatório em extensão pdf. No presente trabalho, será apresentado os dados obtidos pelo cenário base, que será utilizado para comparar com os cenários propostos, a fim de avaliar as diferenças no que tange as emissões de poluentes. O quadro 2 apresenta os resultados obtidos.

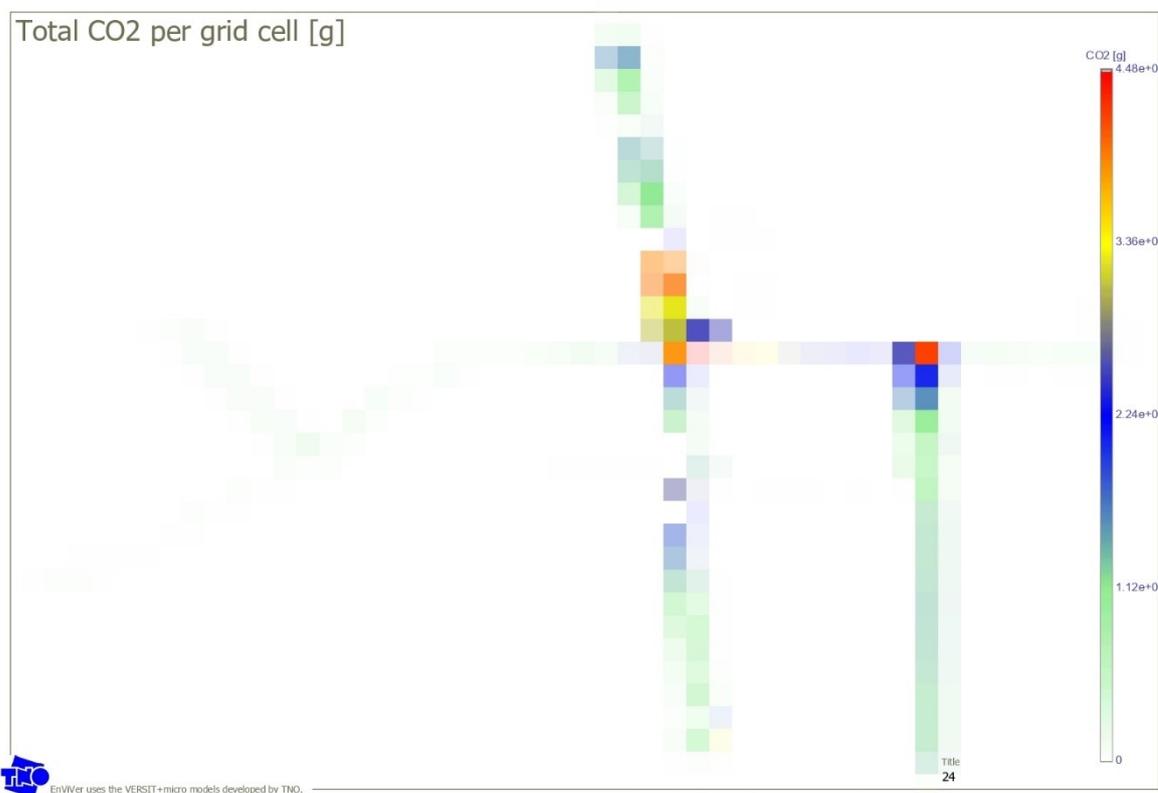
Quadro 2 - Estimativa de poluição atmosférica causada pelo fluxo de tráfego observado

CO ₂	NO _x	MATERIAL PARTICULADO
1598,795 kg	2690,120 g	238,897 g
1279,178 kg/h	2152,335 g/h	191,139 g/h
335,657 g/km	564,773 mg/km	50,155 mg/km

Fonte: Autor

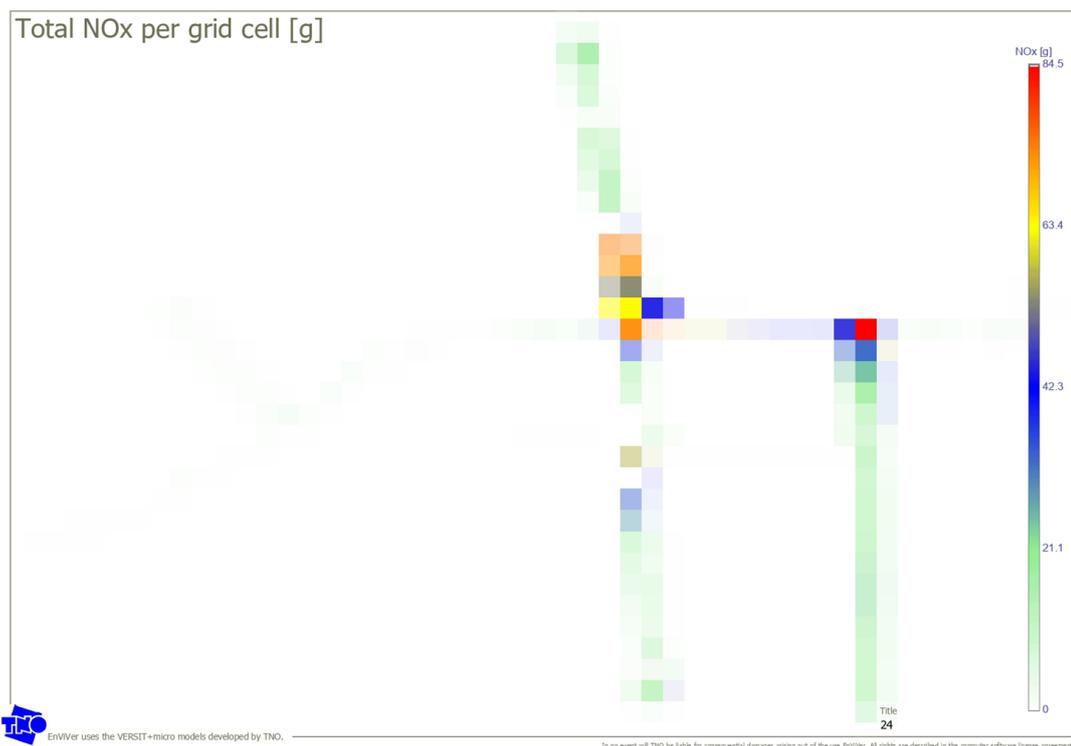
Observa-se, a partir dos relatórios emitidos pelo EnViVER que aproximadamente 81% das emissões de CO₂, 65% das emissões de NO_x e 78% das emissões de material particulado são provenientes dos automóveis e motocicletas, devido a grande quantidade desses tipos de veículos utilizando a estrutura viária. Também observa-se que a maior quantidade de CO₂, NO_x e material particulado, no trecho analisado, está nas áreas de conflitos e próximo aos semáforos pois são os pontos onde há parada de veículos e reaceleração, conforme as figuras 11, 12 e 13.

Figura 11 - Emissão total de CO₂



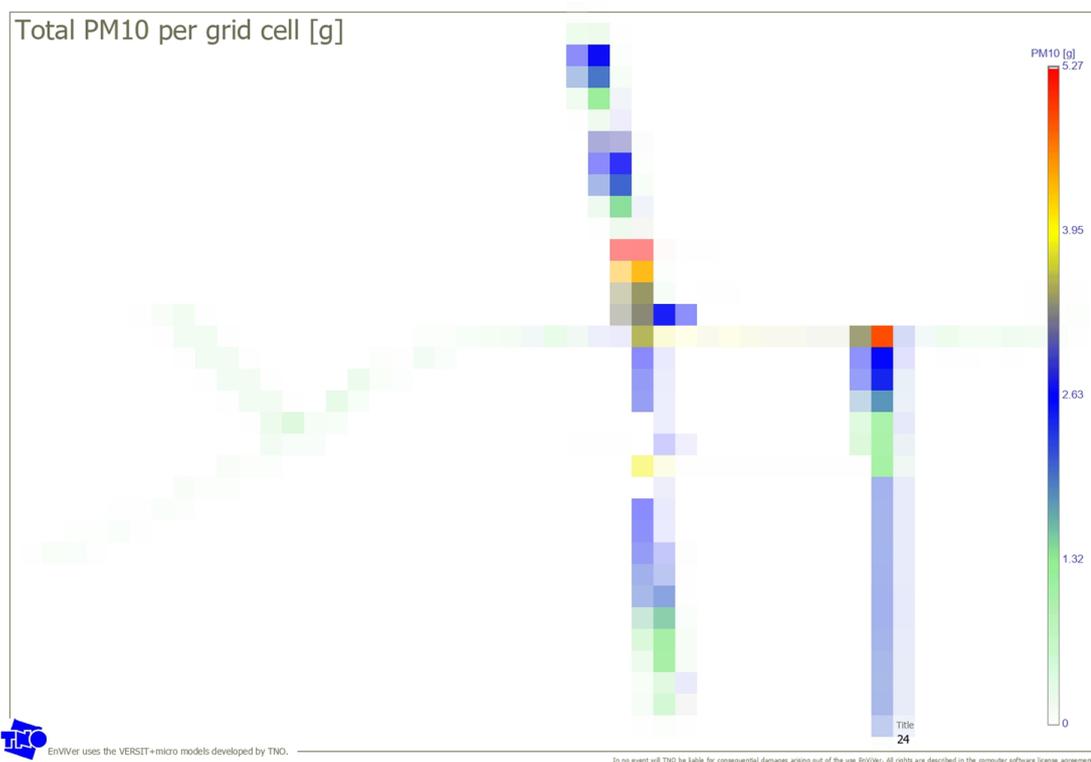
Fonte: Autor/EnViVER

Figura 12 - Emissão total de NOx



Fonte: Autor/EnViVER

Figura 13 - Emissão total de Material Particulado



Fonte: Autor/EnViVER

Os relatórios do EnViVER disponibilizam gráficos onde é possível visualizar as emissões de CO₂, NO_x e Material Particulado por quilômetro, a concentração desses poluentes, além de contador de amostras por trecho e as velocidades dos veículos, todos esses gráficos estão disponíveis no Anexo A. Ante ao exposto, os cenários a seguir tiveram por objetivo principal otimizar a fluidez do fluxo de tráfego visando as melhoras nos parâmetros analisados.

4.6. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Os cenários propostos consistem nas proposições para a alteração da rede, conforme exposto anteriormente. Logo foram apresentados os cinco cenários.

O cenário 1 consiste em um projeto da Prefeitura de Joinville para o trecho analisado, que ainda não foi implementado. A ideia dessa proposta é alterar o cruzamento da Rua Ministro Calógeras, da quadra entre as ruas Getúlio Vargas e do Príncipe para a continuação da Rua Ministro Calógeras, da quadra entre a rua Getúlio Vargas e a Travessa São José. Atualmente, na faixa central da via, há um tempo semafórico exclusivo para esse movimento com a sinalização da placa de regulamentação R-26 – Siga em frente. Na proposta, o cruzamento deixa de existir, sendo o fluxo de tráfego desviado pela rua Plácido Gomes, conforme figura 14, logo, foi necessário coletar dados de desempenho da rua Plácido Gomes, tendo em vista o desvio proposto conforme pode ser visto nas tabelas

Figura 14 - Alteração cenário 1



Fonte: Sepud

Sendo que, após a alteração da codificação da rede, foram obtidas as medidas de desempenho apresentadas nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 - Dados das filas formada nas aproximações (m)

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	46,28	159,9
Ministro Calógeras Oeste	17,19	95,09
JK	76,69	230,72
Plácido Gomes	8,31	62,17

Fonte: Autor

Tabela 12 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem

	Tempo médio de parada por veículo (s)	Número médio de paradas por veículo	Atraso médio por veículos (s)	Tempo médio de viagem (s)
Ministro Leste → JK	17,33	0,7	25,2	47,17
Ministro Leste → Ministro Oeste	10,77	0,65	16,71	0

Ministro Leste → Getúlio	22,51	0,76	30,83	49,89
Ministro Oeste → Getúlio	18,36	0,73	25,49	42,9
Ministro Oeste → JK	16,79	0,62	23,27	41,28
JK → Getúlio	29,3	1,07	40,36	64,13
JK → Ministro Oeste	29,95	1,22	41,46	63,5
São Paulo x Plácido Gomes				61,26

Fonte: Autor

Tabela 13 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)

	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	15,03	41,31	39,07
JK Sul → Centro	25,65	46,84	45,97
Ministro Oeste	0,37	47,79	39,44
Ministro sentido Batalhão	35,27	49,01	48,32
Getúlio Vargas	36,11	47,91	47,32

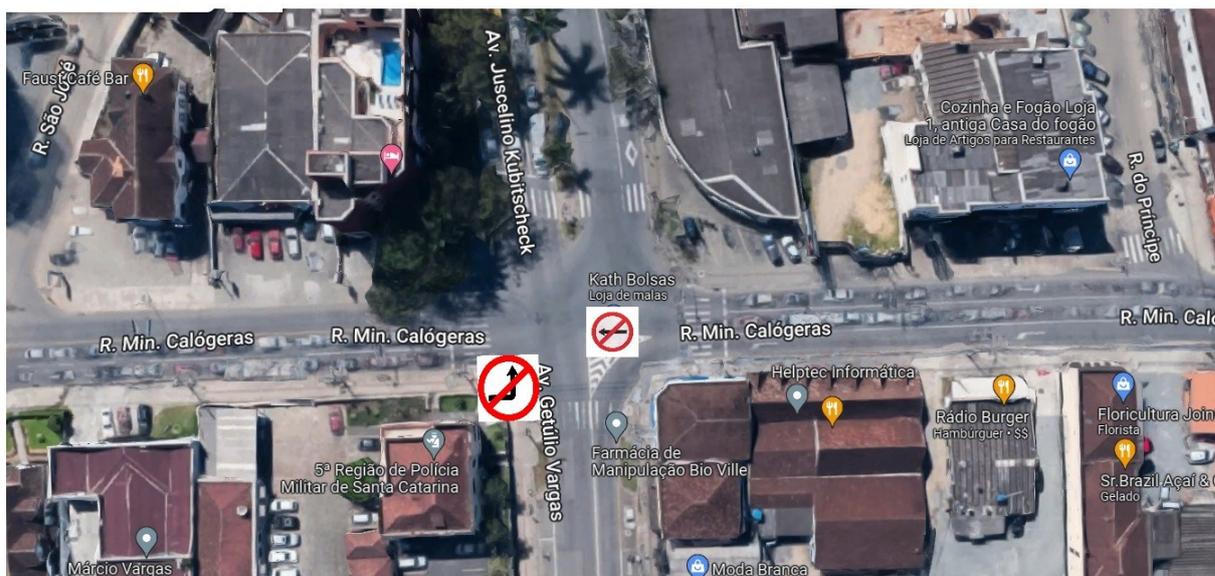
Fonte: Autor

Na primeira alteração proposta, há uma redução substancial nos tamanhos da fila média e fila máxima, no tempo total de fila e um ganho de quase 10 km/h na velocidade média e de quase 20 km/h na média harmônica das velocidades. Isso se deve, principalmente, ao fato de ter sido desviado o fluxo que estava na rua Ministro Calógeras e atravessava a rua Getúlio Vargas. Com essa alteração, foi possível reduzir um tempo no semáforo além de reduzir o volume de tráfego no local.

O cenário 2, tem por base o procedimento operacional do Departamento de Trânsito de Joinville (Detrans) em situações de emergência. Nesse cenário, os movimentos a esquerda e o movimento de seguir em frente da Rua Ministro Calógeras são proibidos, sendo obrigatória a conversão a direita em ambos os lados da Rua

Ministro Calógeras. O processo de proibição, via de regra, se deve a pane semafórica ou falta de luz no local, e é executado por agentes de trânsito com a colocação de cones e barreiras que redirecionam os fluxos do cruzamento. A figura 15 ilustra os movimentos proibidos do cruzamento.

Figura 15 - Alteração cenário 2



Fonte: Google Maps - Modificado

Com a codificação dessa proposta de alteração, chegou-se aos dados de desempenho de tráfego apresentados nas tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Dados das filas formadas nas aproximações

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	11,31	140,52
Ministro Calógeras Oeste	18,53	80,09
JK	76,8	234,73
Plácido Gomes	8,78	63,33

Fonte: Autor

Tabela 15 - Dados de atrasos dos veículos e tempo de viagem (s)

Tempo médio de parada por	Número médio de paradas por	Atraso médio por veículos	Tempo médio de viagem
---------------------------	-----------------------------	---------------------------	-----------------------

	veículo	veículo		
Ministro Leste → JK	1,07	0,17	4,21	25,36
Ministro Leste → Ministro Oeste	10,79	0,65	16,78	54,17
Ministro Leste → Getúlio	2,9	0,44	8,61	28,54
Ministro Oeste → Getúlio	19,1	0,74	26,73	42,82
Ministro Oeste → JK	45,21	14,21	164,09	231,45
JK → Getúlio	29,32	1,11	40,8	64,46
JK → Ministro Oeste	30,31	1,26	42,31	64,65

Fonte: Autor

Tabela 16 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)

	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	81,04	34,96	28
JK Sul → Centro	109,05	48,37	47,68
Ministro Oeste	8,26	44,81	35,84
Ministro sentido Batalhão	174,56	49,1	48,62
Getúlio Vargas	43,41	47,64	46,47

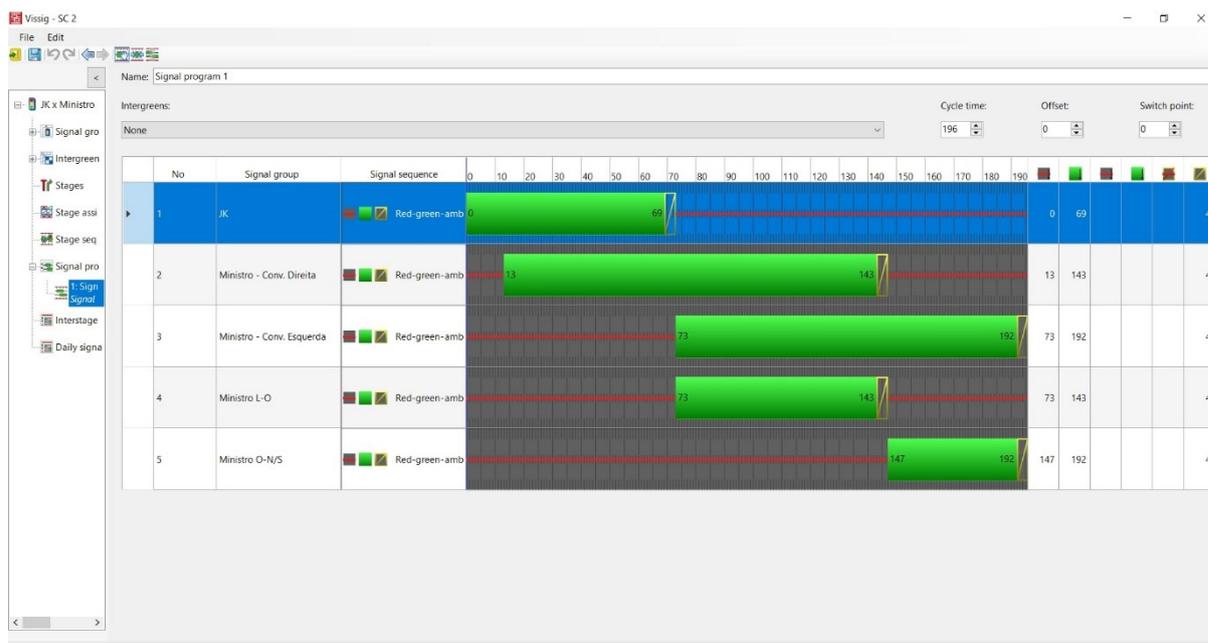
Fonte: Autor

As reduções do comprimento de fila, tempo de fila e tempo de parada nesse cenário é principalmente devido a eliminação de quase todo conflito do cruzamento. Na prática, o cruzamento se assemelha a uma rotatória considerando a quadra das ruas Ministro Calógeras Leste, Getúlio Vargas e Rio do Sul como o meio da rotatória, porém o semáforo é mantido para ordenar os fluxos da avenida JK e da rua Ministro Calógeras Oeste. No lado leste da rua Ministro Calógeras, o semáforo passa a ser só para a travessia do pedestre aumentando a fluidez desse lado do cruzamento.

O cenário 3 consiste na reprogramação semaforica a partir do método de Webster. É calculado o tempo de ciclo ótimo para o local e redistribuído os tempos de

acordo com o método. Nos movimentos não conflitantes, foi estendido o tempo de vermelho, a fim de possibilitar a travessia de pedestre, sendo assim, foi excluído o tempo de vermelho geral, fase 4 no plano de fases do semáforo. Não há nenhuma realocação de volumes de tráfego ou restrições de movimentos. A figura 16 apresenta o novo plano de fases do semáforo.

Figura 16 - Novo plano semafórico



Fonte: Autor

As tabelas 17, 18 e 19, mostram os valores obtidos como resultado da alteração na simulação.

Tabela 17 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	76,67	308,23
Ministro Calógeras Oeste	55,3	170,85
JK	287,88	336,42

Fonte: Autor

Tabela 18 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem (s)

Tempo médio de parada por veículo	Número médio de paradas por veículo	Atraso médio por veículos	Tempo médio de viagem

Ministro Leste → JK	14,06	0,54	21,19	39,02
Ministro Leste → Ministro Oeste	45,69	0,82	53,48	72,52
Ministro Leste → Getúlio	16,21	0,47	22,16	40,11
Ministro Oeste → Getúlio	67,6	1,05	77,57	90,11
Ministro Oeste → JK	62,19	0,89	70,86	85,09
JK → Getúlio	159,6	2,01	179,92	203,72
JK → Ministro Oeste	171,66	2,43	194,56	216,58

Fonte: Autor

Tabela 19 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)

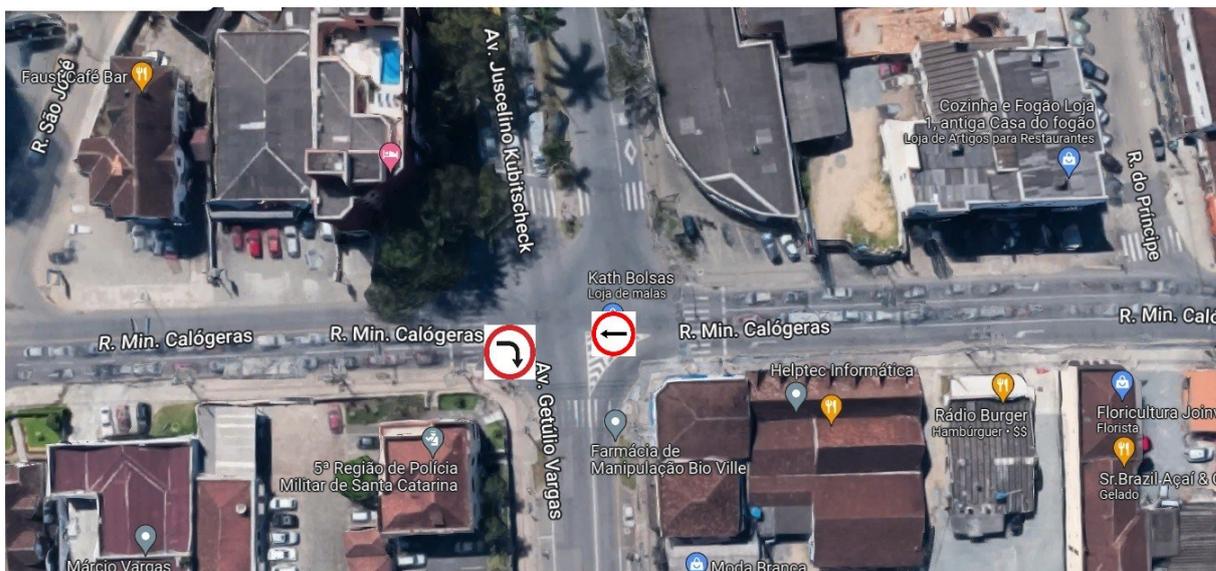
	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	15,21	41,42	38,45
JK Sul → Centro	41,91	49,66	49,23
Ministro Oeste	0,29	47,13	37,94
Ministro sentido Batalhão	93,86	50,28	49,99
Getúlio Vargas	131,21	45,29	43,78

Fonte: Autor

Após a alteração semafórica, percebeu-se que a rua Ministro Calógeras teve um ganho considerável na fluidez com o aumento do ciclo total. Porém na avenida JK houve um aumento nas filas e no atraso de maneira geral, provavelmente devido ao grande volume de fluxo no horário em estudo que acaba formando longas filas no tempo de vermelho do cruzamento, prejudicando o desempenho global da rede.

No cenário 4, a alternativa encontrada é a manutenção do movimento de seguir em frente da rua Ministro Calógeras, porém é proibida a conversão à esquerda da mesma rua no sentido Oeste – Centro, obrigando os veículos a realizar a conversão à direita conforme figura 17.

Figura 17 - Alteração cenário 4



Fonte: Google Maps - Adaptado

As tabelas 20, 21 e 22, mostram os valores obtidos como resultado da alteração na simulação.

Tabela 20 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	45,66	214,31
Ministro Calógeras Oeste	16,9	75,55
JK	74,43	222,54

Fonte: Autor

Tabela 21 - Dados de atrasos dos veículos e tempos de viagem (s)

	Tempo médio de parada por veículo	Número médio de paradas por veículo	Atraso médio por veículos	Tempo médio de viagem
Ministro Leste → JK	2,43	0,42	10,25	28,15
Ministro Leste → Ministro Oeste	21,35	0,83	30,08	49,12
Ministro Leste → Getúlio	19,87	0,66	26,94	44,88
Ministro Oeste → Getúlio	17,65	0,67	24,65	37,71

Ministro Oeste → JK	30,04	2,26	65,9	135,8
JK → Getúlio	28,27	1,04	39,16	62,8
JK → Ministro Oeste	28,5	1,15	39,68	61,68

Fonte: Autor

Tabela 22 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)

	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	19,14	38,4	34,51
JK Sul → Centro	24,61	49,48	48,99
Ministro Oeste	0,06	49,9	47,2
Ministro sentido Batalhão	36,46	49,62	49,25
Getúlio Vargas	31,74	45,38	43,6

Fonte: Autor

Com a proibição da conversão à esquerda, há uma melhora nos tempos de fila, pois o tempo de verde dessa fase é redistribuído para as outras fases do ciclo, aumentando o tempo de verde para a travessia da rua Ministro Calógeras o que impacta nos tempos de fila e número de paradas em fila gerando uma redução desses valores.

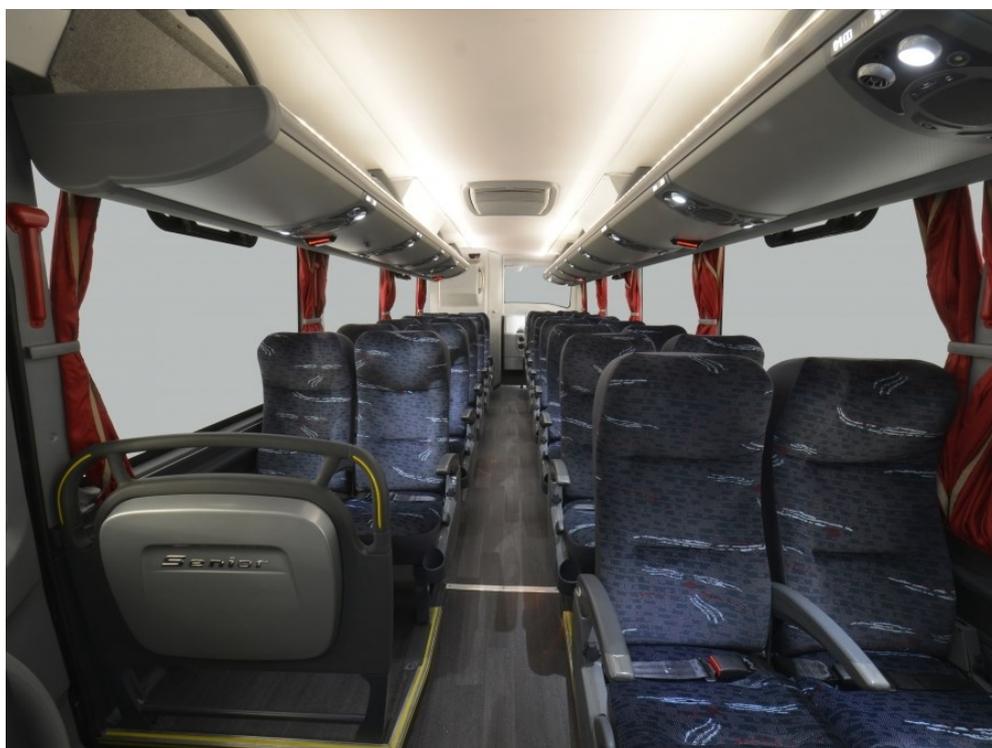
No cenário 5 a única alteração proposta é a implementação de um serviço de transporte público seletivo, com micro-ônibus onde é proibido o transporte de passageiros em pé, com poltronas padrão executivo, ar-condicionado e wi-fi a bordo, conforme veículo das figuras 18 e 19. A proposta é que esse serviço seja capaz de captar pelo menos dez por cento dos usuários do transporte individual, ou seja, há uma queda de dez por cento nos fluxos do cruzamento como um todo (SOUZA, 2015).

Figura 18 - Modelo de micro-ônibus - Imagem externa



Fonte: Marcopolo S.A.

Figura 19 - Modelo de micro-ônibus - Imagem interna



Fonte: Marcopolo S.A.

As tabelas 23, 24 e 25, mostram os valores obtidos como resultado da alteração na simulação.

Tabela 23 - Dados das filas formadas nas aproximações (m)

	Comprimento médio da fila	Comprimento máximo da fila
Ministro Calógeras Leste	177,22	367,64
Ministro Calógeras Oeste	43,33	127,7
JK	51,71	162,39

Fonte: Autor

Tabela 24 - Dados de atrasos dos veículos e tempo de viagem (s)

	Tempo médio de parada por veículo	Número médio de paradas por veículo	Atraso médio por veículos	Tempo médio de viagem
Ministro Leste → JK	16,05	0,92	27,42	45,24
Ministro Leste → Ministro Oeste	137,43	2,82	162,85	181,82
Ministro Leste → Getúlio	19,01	0,67	25,68	43,61
Ministro Oeste → Getúlio	60,76	1,35	73,15	85,88
Ministro Oeste → JK	46,76	1,08	57,43	71,91
JK → Getúlio	21,03	0,85	30,27	54,16
JK → Ministro Oeste	20,77	1,01	30,42	52,42

Fonte: Autor

Tabela 25 - Tempo de fila (s) e velocidades (km/h)

	Tempo total da fila	Média aritmética das velocidades	Média harmônica das velocidades
Ministro Leste	32,76	38,08	31,75
JK Sul → Centro	52,53	48,21	47,54
Ministro Oeste	0,27	47,25	37,58
Ministro sentido Batalhão	134,94	48,95	48,54
Getúlio Vargas	35,32	48,17	47,47

Fonte: Autor

No cenário 5, também é possível observar uma redução significativa nos tempos de fila, um ganho nas velocidades médias e redução no tempo de fila, pois a implementação de um novo modal de transporte com atratividade inicial de 10% é capaz de reduzir na mesma proporção a quantidade de veículos circulando no local. Quanto maior for a capacidade de atração desse novo sistema, maior a melhora dos parâmetros de fluxo de tráfego, tendo em vista que haverá menos veículos circulando.

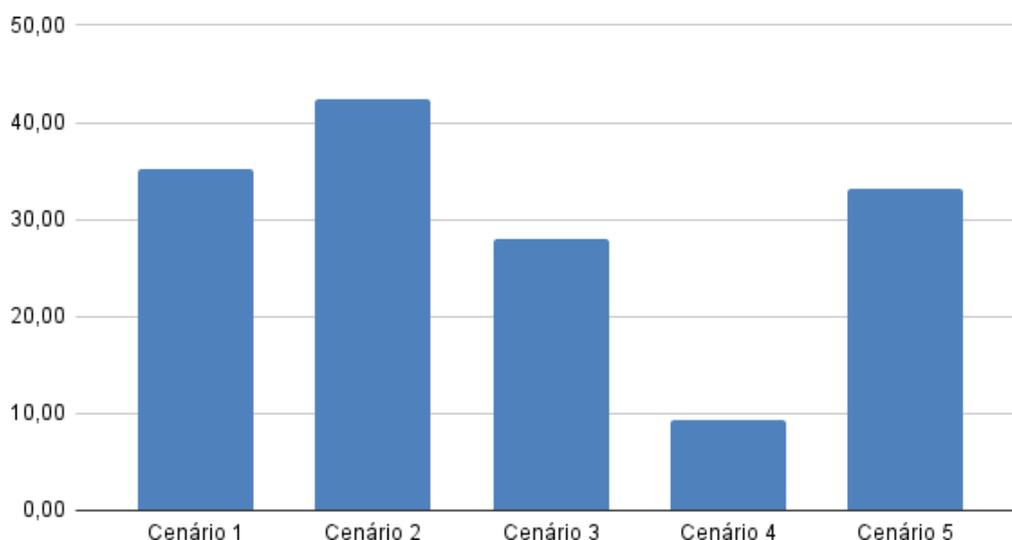
Após a elaboração e análise dos cenários propostos, foi realizada a comparação dos resultados obtidos pelas simulações. Nesse momento, os dados foram analisados em conjunto para que seja possível observar os ganhos de cada proposta apresentada.

4.7. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS REDES

Para uma análise mais avançada dos parâmetros coletados na saída das simulações, nessa etapa do presente trabalho, foi feita a comparação dos dados das tabelas da seção anterior. Com esses dados, é possível determinar qual cenário pode ser mais vantajoso para uma rede mais equilibrada, ou se nenhuma das propostas elaboradas é capaz de melhorar o cenário atual.

O gráfico da figura 20, mostra as reduções percentuais das melhorias dos tempos de viagens.

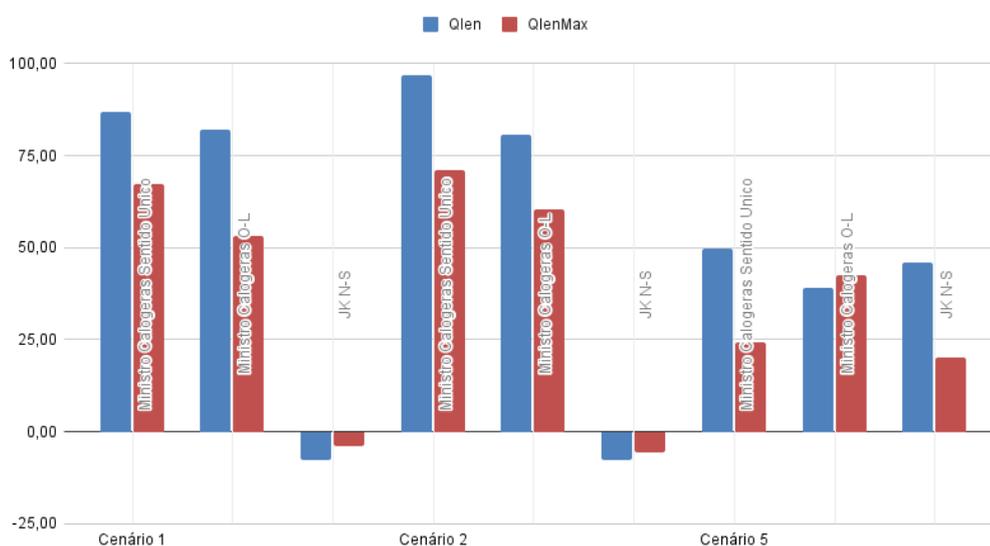
Figura 20 - Redução dos tempos de viagem (em %)



Fonte: Autor

A partir do gráfico, pode-se observar que os cenários propostos pela prefeitura (cenário 1), a alteração utilizada pelos agentes de trânsito do Detrans (cenário 2) e a inclusão de um novo modal de transporte público (cenário 5), obtiveram os maiores ganhos nesse parâmetro, possivelmente devido as alterações nos fluxos de tráfego e a distribuição dos fluxos em uma área maior, utilizando de uma forma melhor (mais igualitária) a infraestrutura da região. Observa-se também que mesmo nos cenários em que há um aumento da distância a ser percorrida para a realização de determinado movimento, (exemplo, no cenário 2 a conversão à esquerda na rua Ministro Calógeras oeste passa a ser proibida, aumentando a distância a ser percorrida pelos veículos que desejam ir em direção a Avenida JK) há uma redução no tempo de viagem e conseqüentemente nas velocidades médias, o que é explicado pela redução dos conflitos. Por esses motivos a análise se aprofundou nos cenários 1, 2 e 5. Para confirmar essa tendência de melhoria, foram analisados os dados de redução da fila média e fila máxima nas aproximações conforme figura 21.

Figura 21 - Redução percentual do comprimento da fila média e da fila máxima

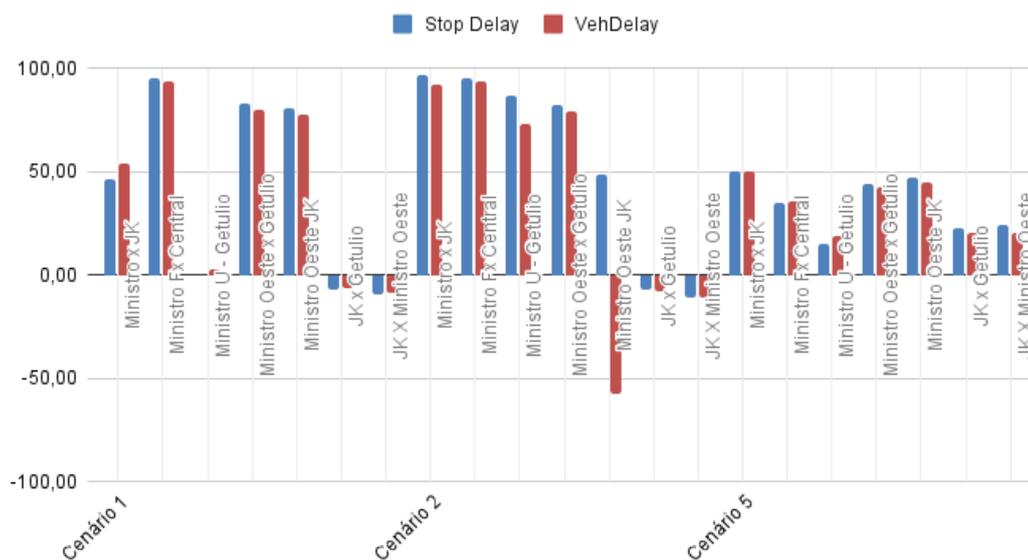


Fonte: Autor

A redução do comprimento da fila foi mais acentuada no cenário 2, tendo em vista que nesse cenário há a restrição de vários movimentos, com isso foi possível a extensão dos tempos de verde do semáforo. Também destaca-se o cenário 5, da implementação do transporte seletivo, pois sem nenhuma alteração semafórica foram

observadas reduções da ordem de 40%. Para prosseguir a análise, foram comparadas as reduções dos tempos médios de parada e dos atrasos por veículos, conforme figura 22.

Figura 22 - Redução dos tempos médios de parada e dos atrasos por veículos

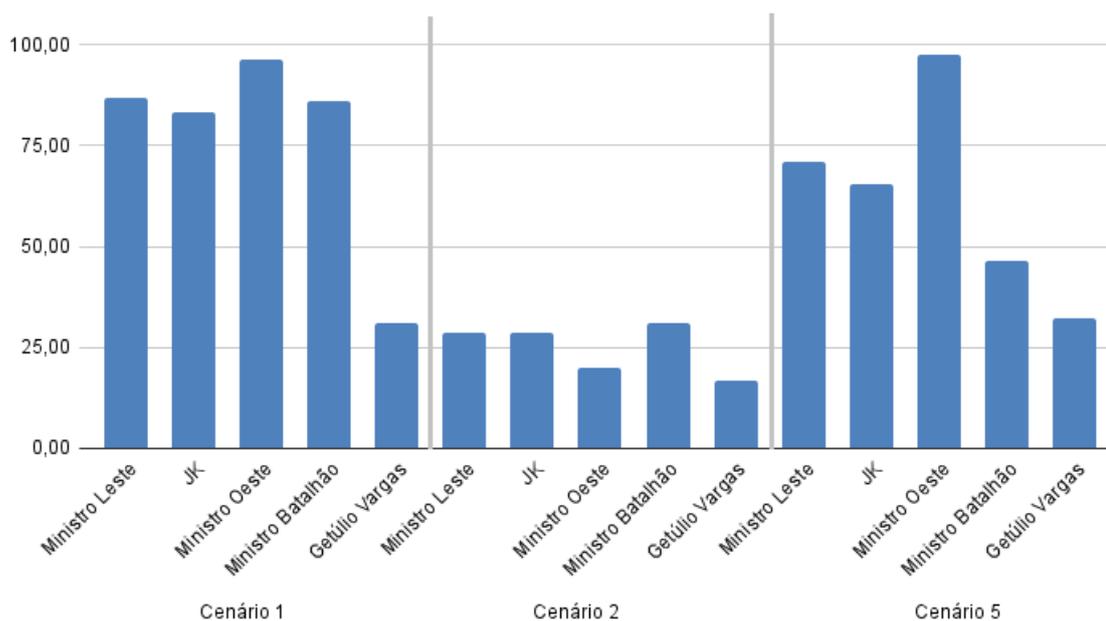


Fonte: Autor

Nos tempos médios de parada e nos atrasos médio observou-se uma forte redução em alguns trechos, porém na conversão da Rua Ministro Calógeras Oeste em direção a Avenida JK há uma piora nos atrasos dos veículos no cenário 2, o que pode ser explicado pelo aumento do trajeto do deslocamento, em relação ao trajeto ideal, devido à proibição de conversão à esquerda porém há uma melhora significativa nas outras aproximações o que pode ser interessante a partir da análise da rede como um todo. Observa-se, novamente, uma forte redução nos tempos do cenário 5 em todos os trechos analisados.

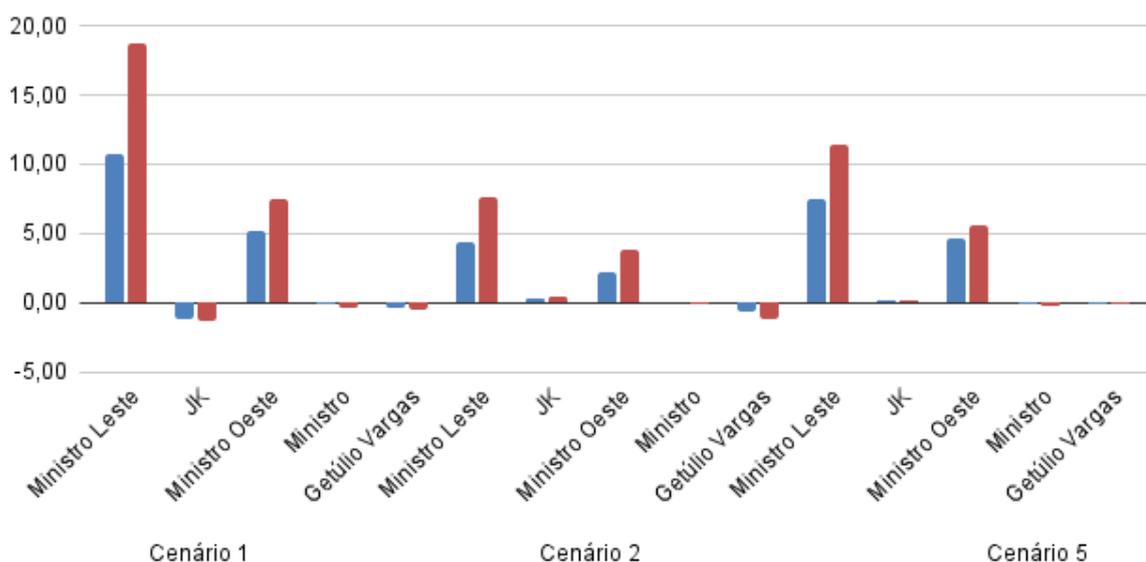
O último conjunto de dados foi dividido em dois gráficos. O primeiro é referente à redução percentual dos tempos de fila e o segundo é a melhora nas velocidades média (aritmética e harmônica), conforme figuras 23 e 24.

Figura 23 - Percentual de melhora dos tempos de fila



Fonte: Autor

Figura 24 - Aumento das velocidades médias - aritmética e harmônica



Fonte: Autor

Com a análise dos gráficos acima, nota-se um aumento da velocidade média mais significativo no cenário 1. O gráfico de melhora do tempo de fila, indica os cenários 1 e 5 como os de maior melhora, portanto, para a análise das emissões de poluentes, foi dado um enfoque maior para esses dois cenários. Outros dados comparativos de todos os cenários propostos estão no Anexo A.

4.8. COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES

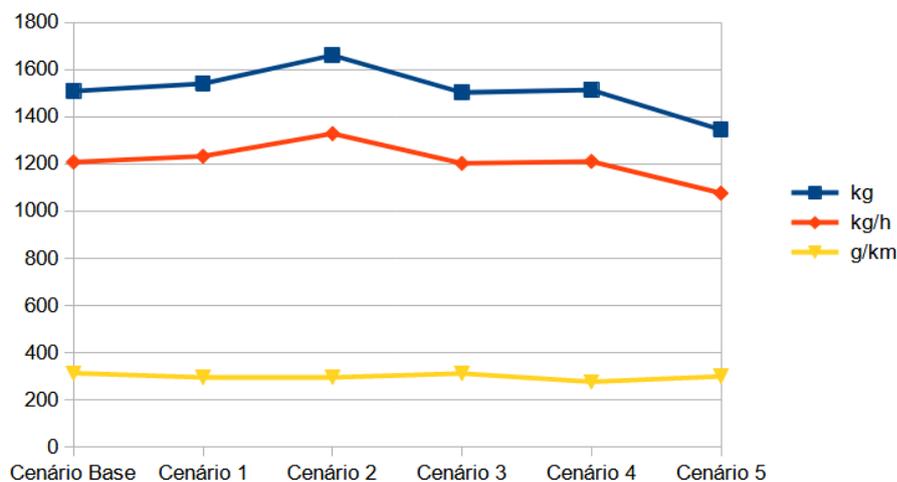
A emissão de poluentes atmosféricos é muito importante tendo em vista o exposto no capítulo 2 desse trabalho. Para a análise dos efeitos do fluxo de tráfego na poluição atmosférica, foi analisado, a partir dos gráficos e dados de saída do software EnViver, as emissões totais de CO₂, NO_x e material particulado. Abaixo são apresentados os dados compilados. No Anexo A, encontram-se os gráficos completos das emissões que originaram a tabela 26 e as figuras 25, 26 e 27, além dos gráficos de emissões por quilômetro e a concentração das emissões.

Tabela 26 - Emissões de poluentes atmosféricos na rede simulada

	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	Material Particulado (g)
Cenário Base	1508,68	2498,74	226,57
Cenário 1	1539,92	2457,1	220,8
Cenário 2	1660,18	2625,96	238,94
Cenário 3	1502,58	2492,55	311,81
Cenário 4	1513,27	2404	226,18
Cenário 5	1344,77	2219,53	205,19

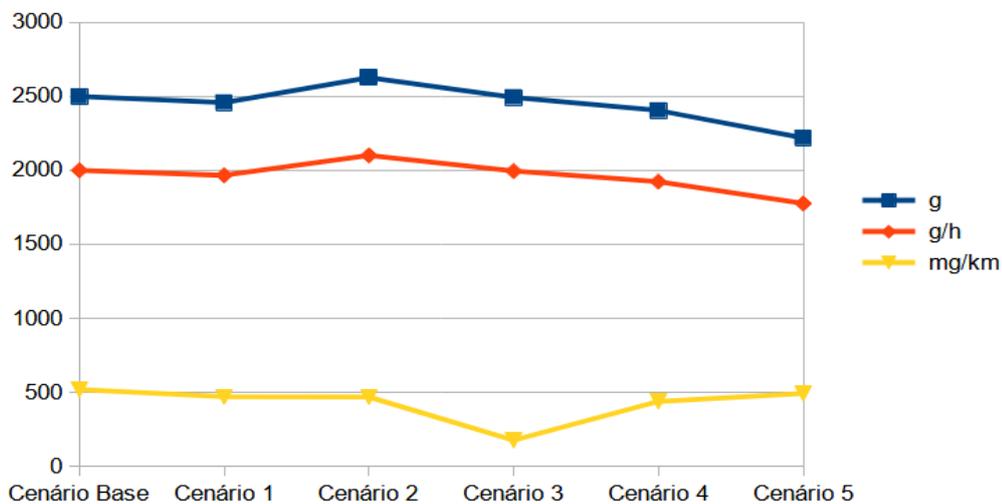
Fonte: Autor

Figura 25 - Emissões de CO₂ por cenário simulado



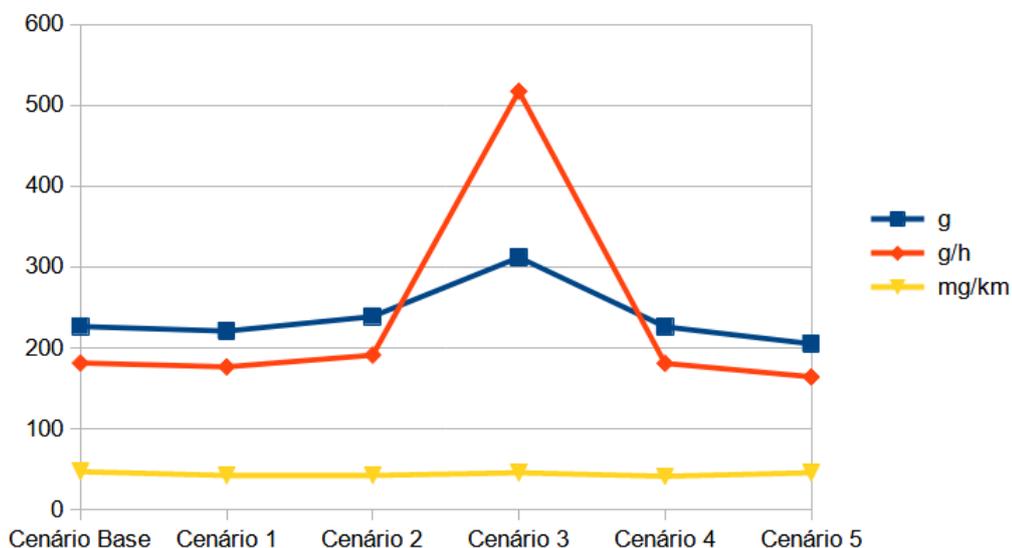
Fonte: Autor

Figura 26 - Emissões de NOx por cenário simulado



Fonte: Autor

Figura 27 - Comparação das emissões de Material Particulado por cenário



Fonte: Autor

Ao analisar as emissões, é possível verificar que não apresenta variação significativa entre os cenários propostos e o cenário base, exceto o cenário 5 onde é implementado um novo modal de transporte público. Nesse cenário há a maior redução das emissões de poluentes atmosféricos o que pode ser explicado pela redução do fluxo de tráfego com a utilização do transporte público, o que gera uma

redução das emissões de poluentes causada por veículo automotor, uma vez que há mais passageiros em um mesmo veículo. Portanto, do ponto de vista ambiental, essa é a melhor solução entre as simuladas.

5. CONCLUSÃO

A implementação de alterações viárias com o uso de microsimulação de tráfego se mostrou eficiente nas análises de tempo de viagem, comprimento e tempo de fila e na análise das velocidades médias. É de suma importância que o modelo codificado na simulação seja calibrado para representar de maneira fidedigna o fluxo de tráfego e o comportamento observado no trecho de estudo. Para isso é fundamental que estejam disponíveis dados de fluxo de tráfego, tempo de semáforo e parâmetros geométricos da via.

Grandes obras viárias não necessariamente são as únicas soluções para melhorar a fluidez de uma região. Devido a escassez de recursos e o tempo de execução, obras de grande porte tem se tornado cada vez mais pontuais. Por isso a análise do trecho a ser estudado é importante para determinar alterações possíveis, com tempo de implantação curto e baixo custo.

Os resultados da simulação indicaram a possibilidade de redução de até 90% no tamanho da fila formada no cruzamento semaforizado, o que indica a viabilidade das propostas analisadas. Também foi possível observar uma melhora de até 10% nos índices de emissão atmosférica com a implementação de um novo modal de transporte público. A implementação de novas tecnologias podem potencializar as melhoras apresentadas, tanto para parâmetros de tráfego quanto de emissões atmosféricas.

A análise das emissões atmosféricas por veículos automotores pode ser realizada com o uso de ferramentas próprias associada a simuladores de tráfego. Os resultados das análises são de suma importância para os projetos viários, pois integram desempenho de tráfego e cuidado ambiental.

Uma das formas de melhorar a fluidez de tráfego é qualificando o transporte público. A implementação de linhas novas e novo modal onde se priorize o conforto e agilidade pode ser capaz de atrair usuários do transporte individual e conseqüentemente diminuir a demanda pela estrutura viária.

A falta de histórico de dados de fluxo de tráfego assim como a restrição da quantidade de locais com esse tipo de dado se tornou uma dificuldade para a análise mais ampla da região do trecho estudado. Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise dos resultados de futuras alterações no trecho estudado, a aplicação da

metodologia descrita em outros locais para estudo, a criação de cenários distintos dos apresentados e a utilização de novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- AL-KAREAWI, Z.; AL-OBAEDI, J. Simulation of U-turn traffic based on VISSIM and PARAMICS micro simulation. **Journal of Physics: Conference Series**. v. 1895, n. 1, p.012030, 2021
- ANYA, A. R. **Application of AIMSUN micro simulation model in estimating emissions on signalized arterial corridors**. Master Thesis of Science, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 2013.
- ARAUJO, A. M. **Estimação da brecha crítica em interseções não semaforizadas utilizando simulação microscópica de tráfego**. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AYALA, R. J. L. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores para o processo de calibração**. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 246p., 2013
- BARCELÓ, J. *et al.* **Safety indicators for microsimulation-based assessments**. In Proceedings of the 82ND ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, D.C., USA, 2003. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/19427>. Acesso em: 8 fev. 2022.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of traffic simulation**. New York: Springer, 2010.
- BETHONICO, F. C. Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- BRANDÃO, P.V.R. **Estudo da dispersão atmosférica de poluentes originários da frota veicular em Salvador**. Dissertação (mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Programa de pós-graduação em engenharia industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.
- CAPPIELLO, A. **Modeling traffic flow emissions**. Tese (Doutorado) - Massachusetts Institute Technology. Massachusetts. 2002
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo (org.). **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo - 2019**. São Paulo: Cetesb, 2020. 140 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf> Acesso em: 23 fev. 2022
- CHAVES, C. F. **Avaliação do desempenho de medidas de acalmia de tráfego através de micro simulação de tráfego**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação). Instituto Politécnico de Viseu. Portugal. 2017.

CUNTO, F. J. C.; LOUREIRO, C. F. G. O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. **Revista Transportes**, v. 19, n. 3, p. 5-11, 2011.

DE ARAÚJO, A. M.; DE CASTRO NETO, M. M. Calibração do modelo de aceitação de brechas em interseções urbanas com o microssimulador de tráfego VISSIM. **Revista Transportes**, v. 26, n. 3, p. 25-38, 2018

DIAS, H. L. F. **Análise da modelagem integrada da emissão de poluentes atmosféricos provenientes de veículos transportadores de carga em área urbana**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Cap. 6. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11175/1/2014_dis_hlfdias.pdf. Acesso em: 11 agosto 2021.

DIAS, H. L. F. **Methodology for air pollution impact assessment of low emission zones in urban areas of brazil - The case study of Fortaleza**. 2018. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Cap. 6. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/40358/3/2018_tese_hlfdias.pdf. Acesso em: 11 agosto 2021.

EJZENBERG, S. **Reprogramação de semáforos – Método de observação de campo**, São Paulo. Seizenberg – Engenharia Consultoria, 2005

HOLLANDER, Y.; LIU, R. The principles of calibrating traffic microsimulation models. **Transportation**, v. 35, n.3, p.347-362, 2008.

IMASATO, T.; ARIOTTI, P.; JACONDINO, G.; CYBIS, H. **Análise comparativa de simuladores de tráfego para estimativa de CO em áreas urbanas**. Artigo – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2008.

JACONDINO, G. B. **Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego**. Dissertação (mestrado) – UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2005.

LACERDA, V. M. *et al.* Estimção da velocidade média em vias arteriais urbanas com uso do microssimulador VISSIM. **Revista Transportes**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 63–75, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i4.1705. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1705>. Acesso em: 15 fev. 2022.

LACERDA, V.M.; CASTRO-NETO, M. M. Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do vissim para vias arteriais urbanas. **Anais do XXVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. 2014

MAES, A. S. **Avaliação de Fatores que Influenciam as Emissões Veiculares em Centros Urbanos**. Dissertação (mestrado) – UFSC, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

MACHADO, L.; PICCININI, L. S. Os desafios para a efetividade da implementação dos planos de mobilidade urbana: uma revisão sistemática. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, p. 72-94, 2018.

MACHADO, D. C.; VIANNA, G. S. B. Uma análise dos custos da mobilidade urbana no Brasil: Perdas do PIB com deslocamentos. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 11, n. 2, p. 152-172, 12 jul. 2017.

MING, S. H.; **Cálculo do ciclo de verdes ótimos quando o fluxo de saturação não é constante**. Notas Técnicas 208. CET, São Paulo.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Governo Federal do Brasil (org.). **Poluentes Atmosféricos**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidadessustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Governo Federal do Brasil (org.). **Manual de estudos de tráfego**. Brasília, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 13 nov. 2021.

MANVILLE, M.; TAYLOR, B.; SHOUP, D. Traffic Congestion: Three Big Questions, Three Short Answers. UCLA Institute of Transportation Studies. 2021

NORONHA, H. D. B. **Estudo Comparativo de dois Microssimuladores de Tráfego – AIMSUN e VISSIM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

OLIVEIRA, V. C. **Avaliação da relação entre as características da superfície de pavimentos e os níveis de emissão de poluentes atmosféricos**. Dissertação (mestrado) – UFC, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

QUIRINO, F. P. **Modelagem das emissões de poluentes atmosféricos oriundos da atividade de transporte coletivo por ônibus – estudo de caso em São Paulo, SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia de Transportes e Logística), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

SIQUEIRA, M.; DE CASTRO NETO, M. Análise comparativa das simulações mesoscópica e microscópica do vissim na modelagem de trecho urbano. **Anais do Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, v. 1, p. 3850-3861. 2019

SIMON, J. L. Poluição do Ar de Veículos Automotores, Tutela Penal. **Revista de direito ambiental, Revista dos Tribunais**, v. 8, n. 30, p. 85–97, abr.jun., 2003.

VASCONCELLOS, E. A. Congestionamento no trânsito e financiamento da mobilidade – avaliação dos estudos no Brasil e das perspectivas metodológicas, **Revista dos Transportes Públicos**, ANTP, v. 1, n.1, p. 08-28 jan-abril/ 2014.

VIANNA, G. S. B.; YOUNG, C. E. F. Em busca do tempo perdido: uma estimativa do produto perdido em trânsito no Brasil. **Revista Economia Contemporânea**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 403-416, set-dez/2015.

VIEIRA VASQUES, T. **Inventário de Emissões Veiculares no Brasil**. Dissertação (mestrado) – UFSC, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

VILARINHO, C. A. T. **Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Porto. Portugal. 2008.

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de nitrogênio na combustão industrial. **Revista IPT Tecnologia e Inovação**, v.1, n.3, p. 6-19, dez/2016.

WEAVER, L. K. *et al.* Hyperbaric oxygen for acute carbon monoxide poisoning. **New England Journal of Medicine**, v. 347, n. 14, p. 1057-1067, 2002.

ANEXO A – Gráficos de emissões

Figura 28 - Emissões de CO2 por quilômetro - Cenário base

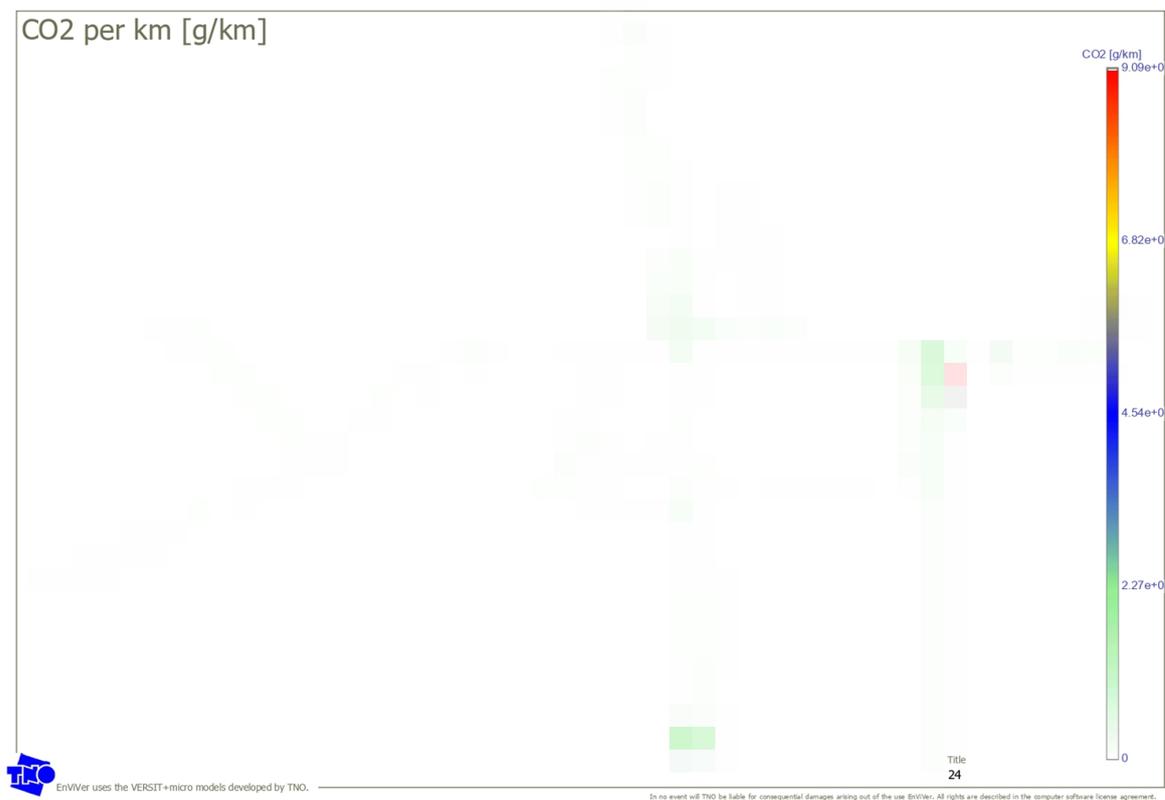
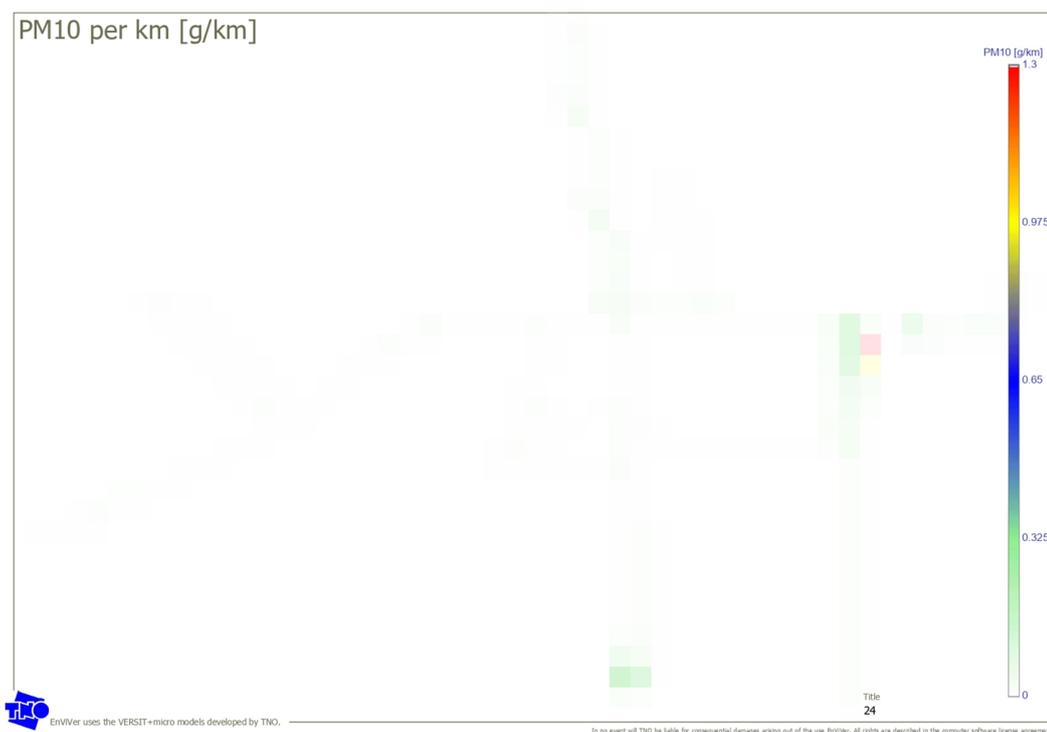


Figura 29 - Emissões de NOx por km – Cenário base



Figura 30 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário base



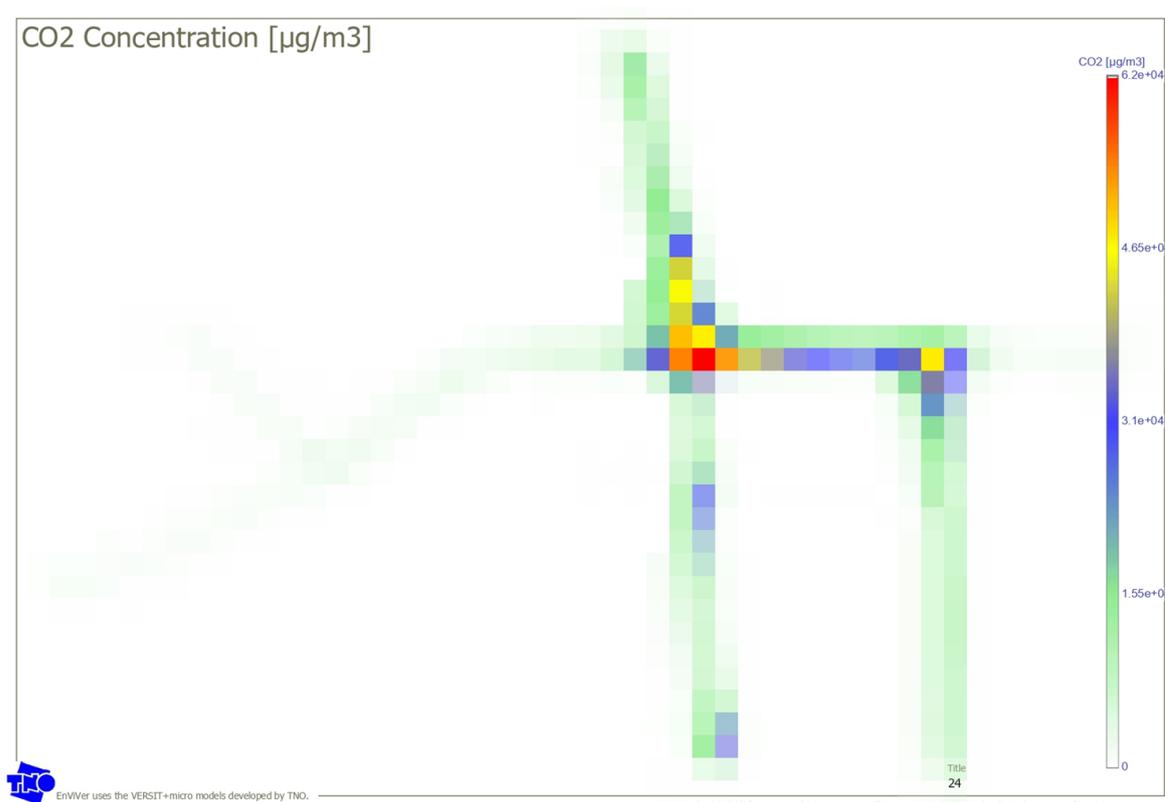


Figura 31 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário base

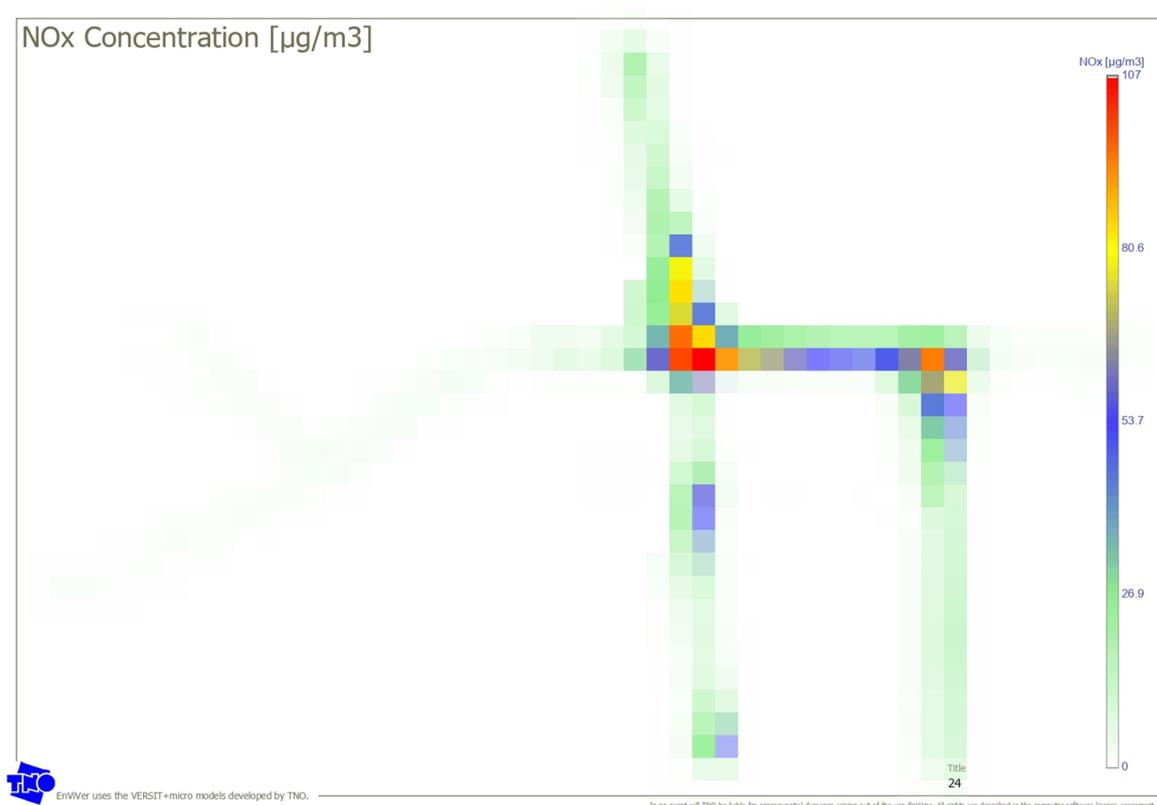


Figura 32 - Concentração das emissões de NOx – Cenário base

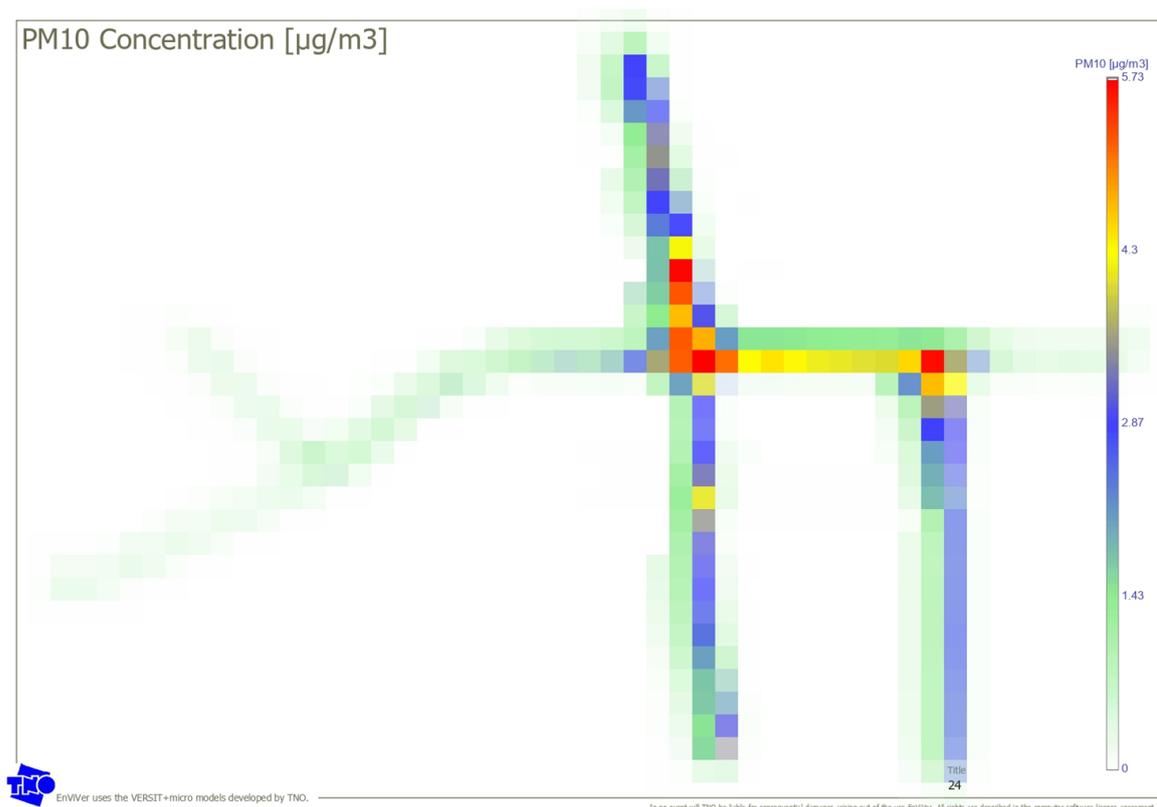


Figura 33 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário base

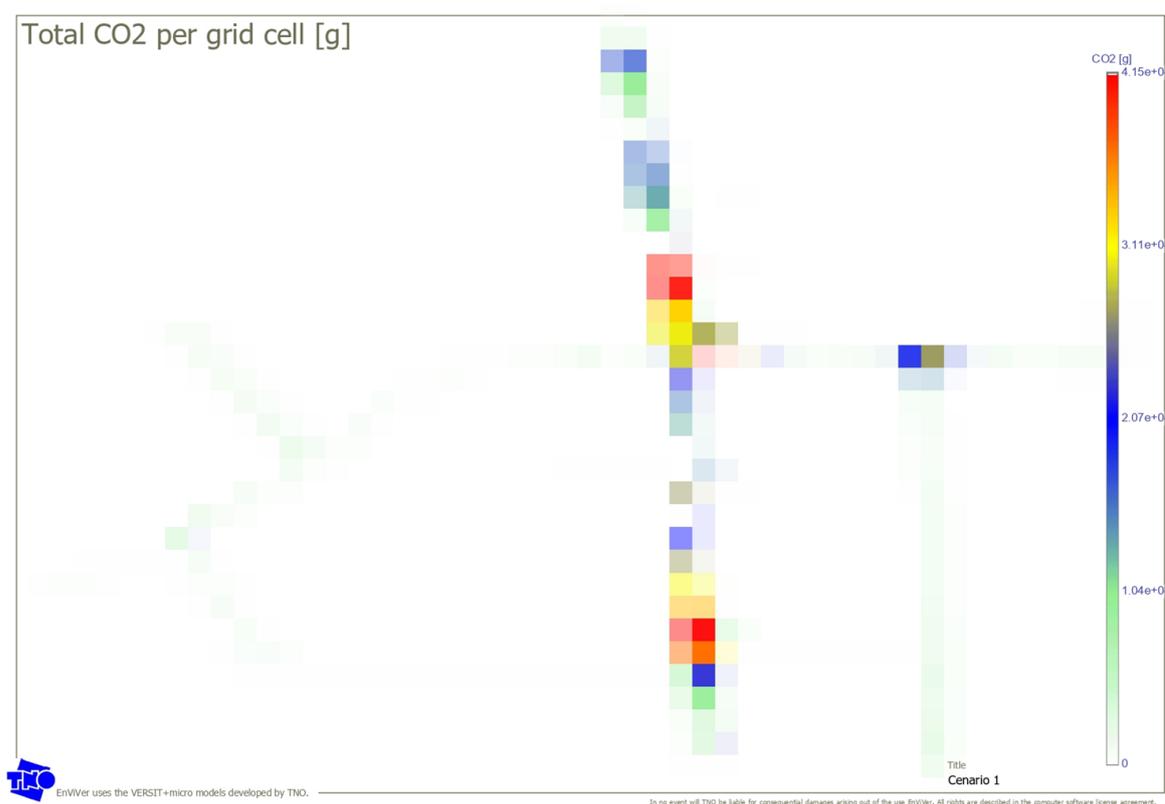


Figura 34 - Total de emissões de CO2 – Cenário 1

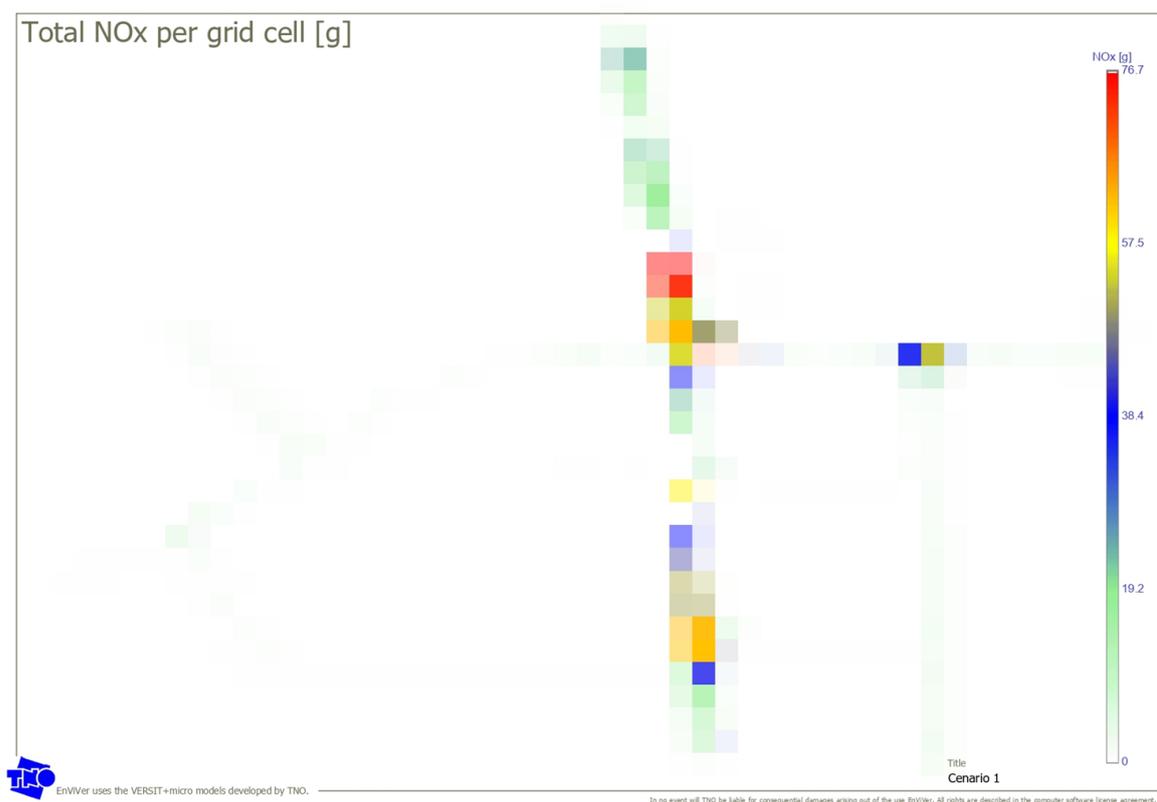


Figura 35 - Total de emissões de NOx – Cenário 1

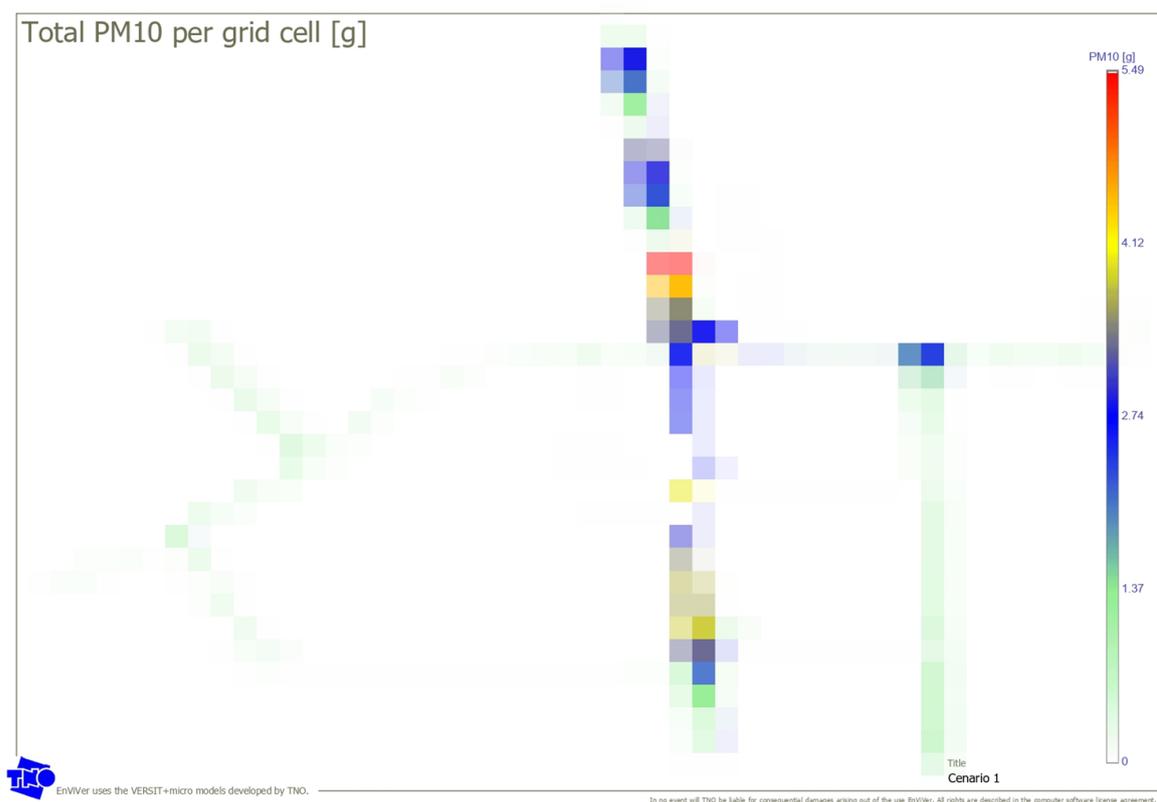


Figura 36 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 1

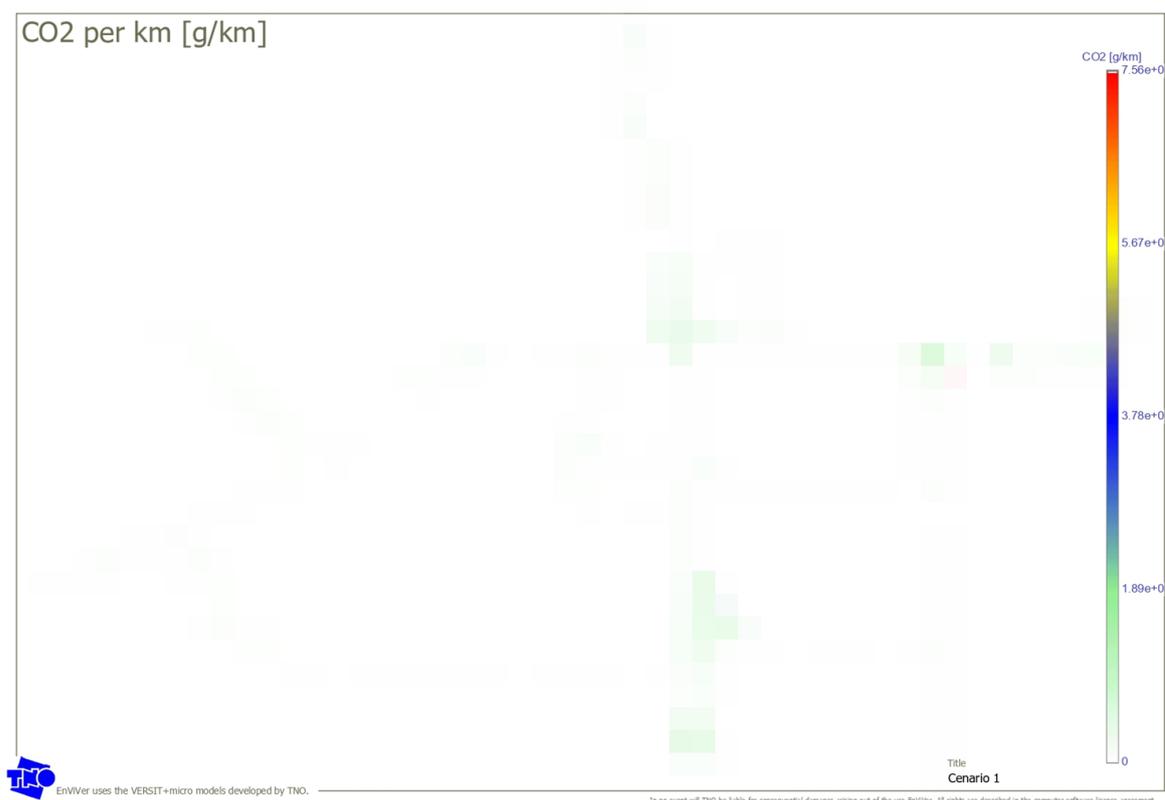


Figura 37 - Emissões de CO2 por km – Cenário 1

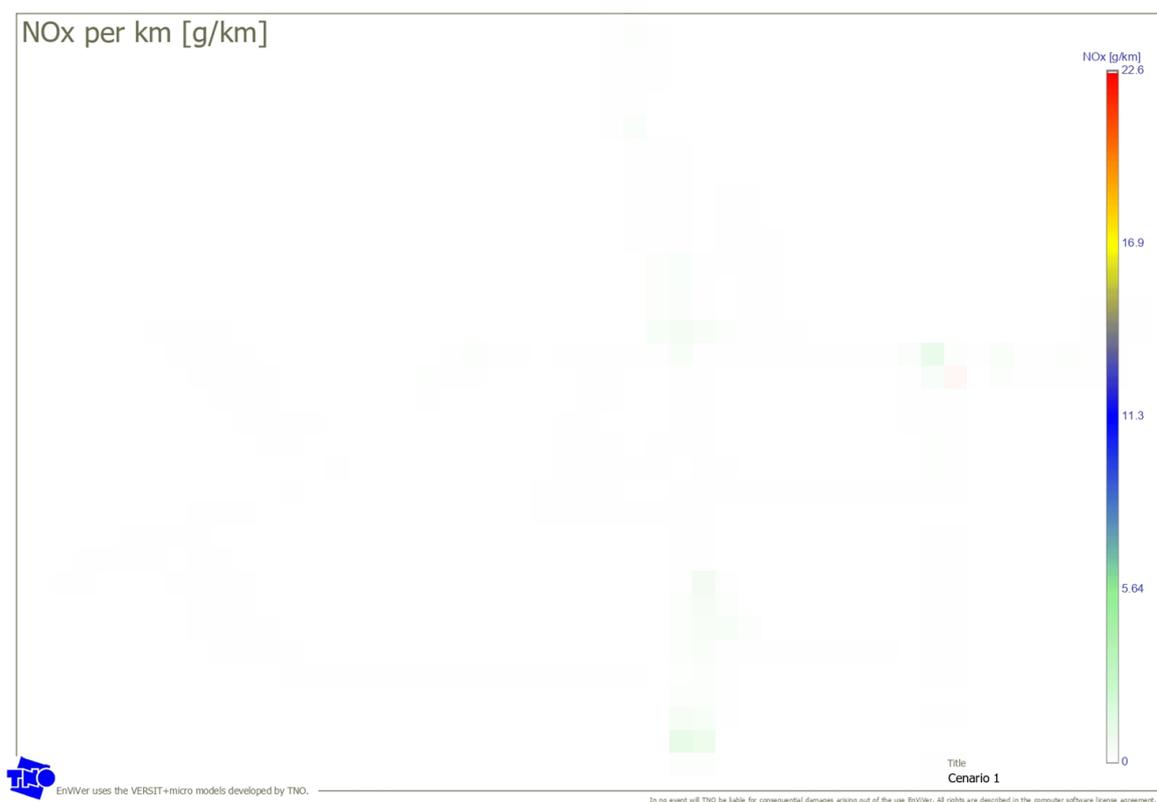


Figura 38 - Emissões de NOx por km – Cenário 1



Figura 39 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 1

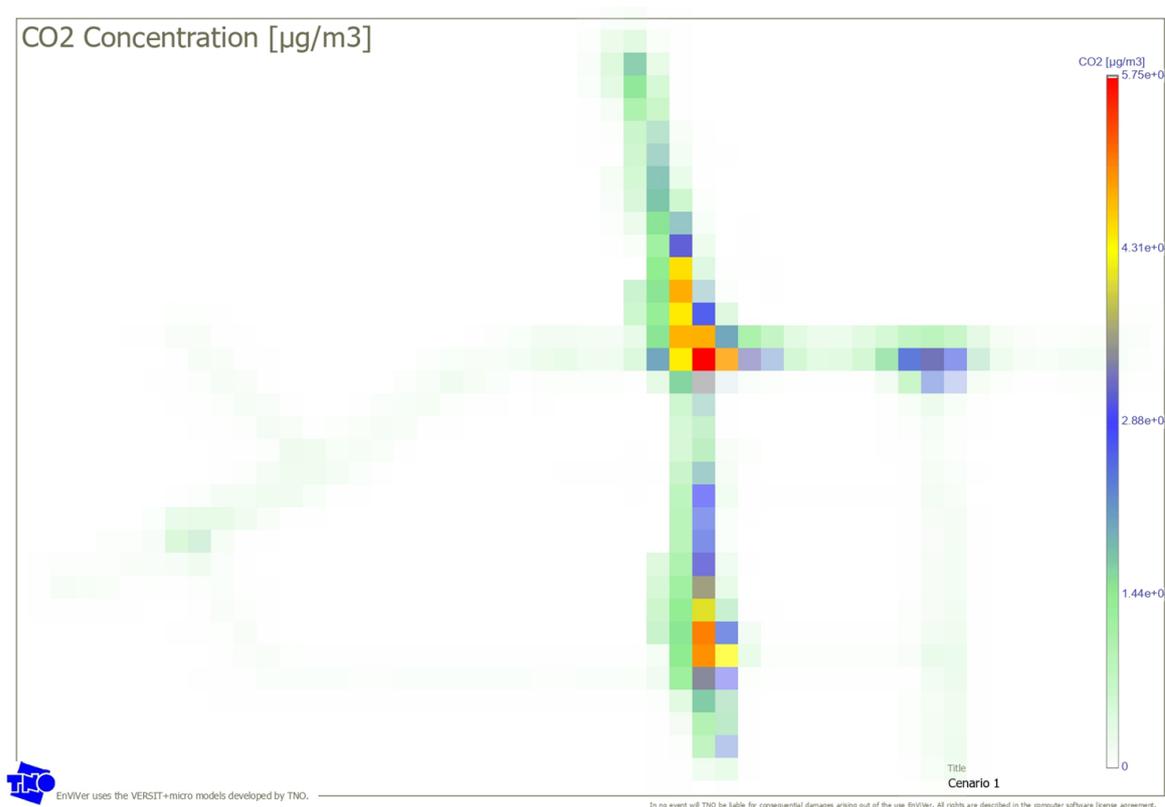


Figura 40 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 1

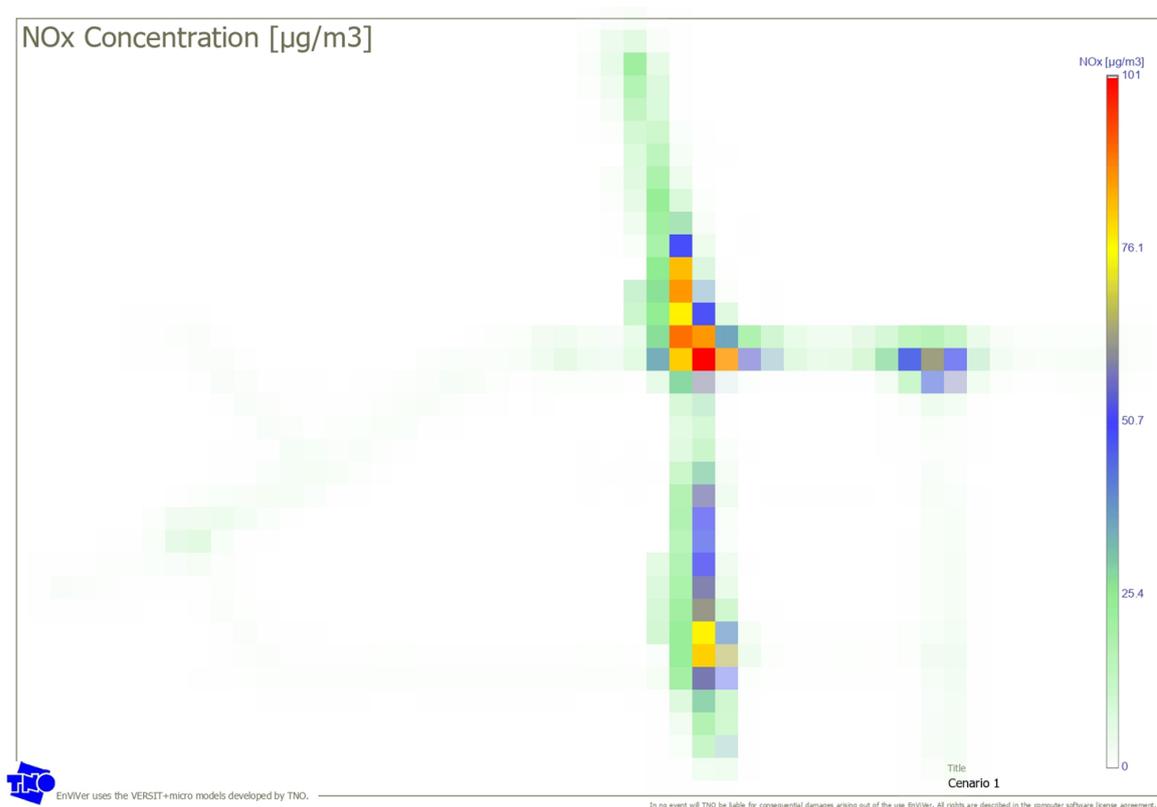


Figura 41 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 1

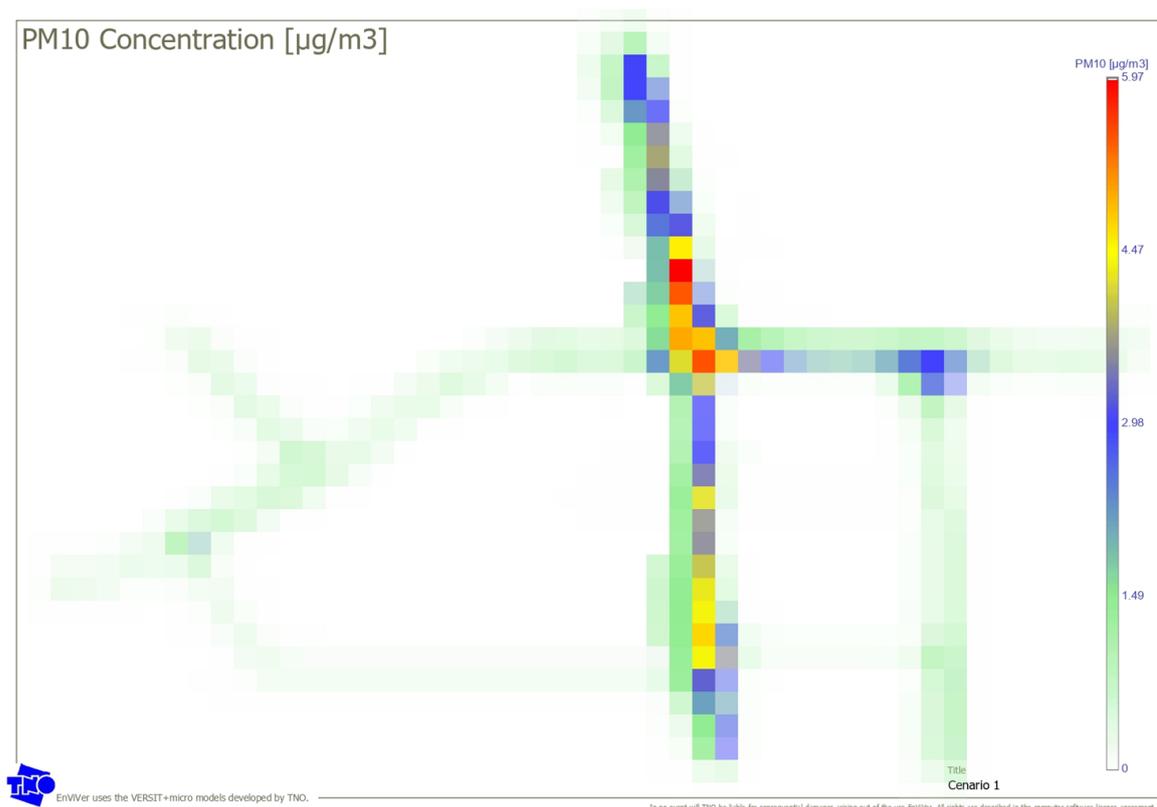


Figura 42 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 1

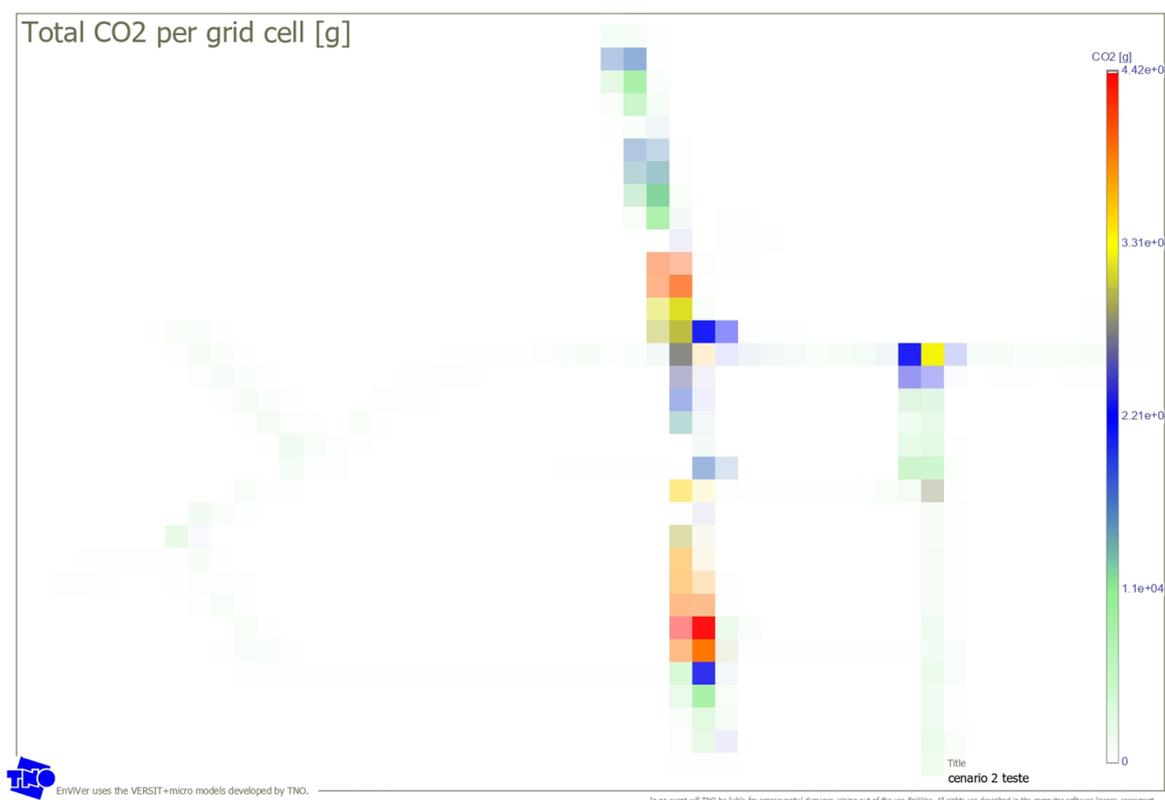


Figura 43 - Total de emissões de CO2 – Cenário 2

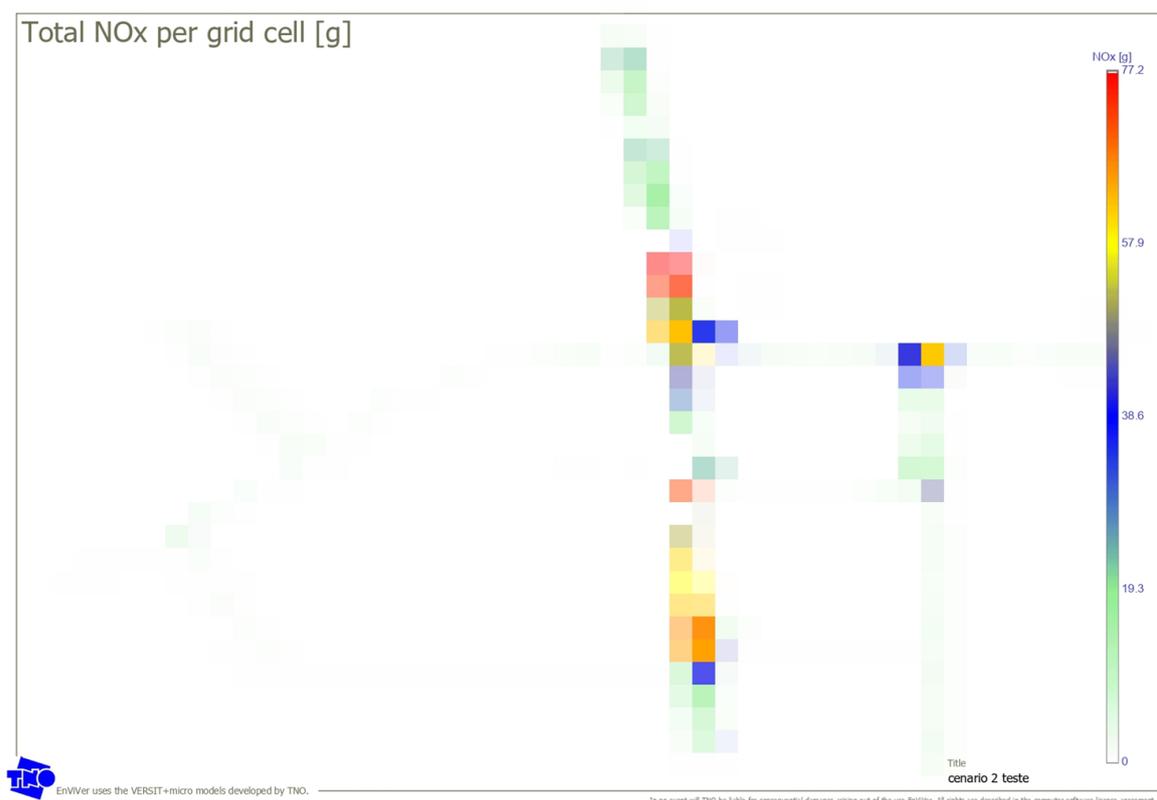


Figura 44 - Total de emissões de NOx – Cenário 2

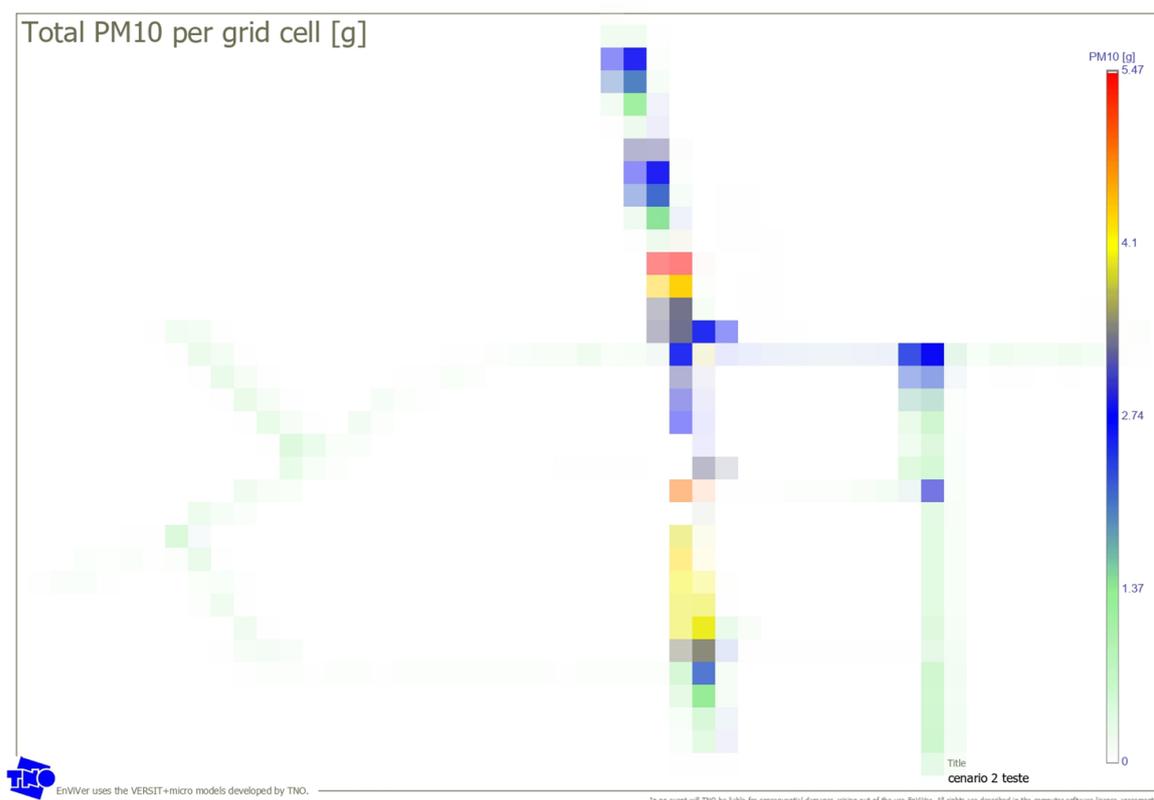


Figura 45 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 2

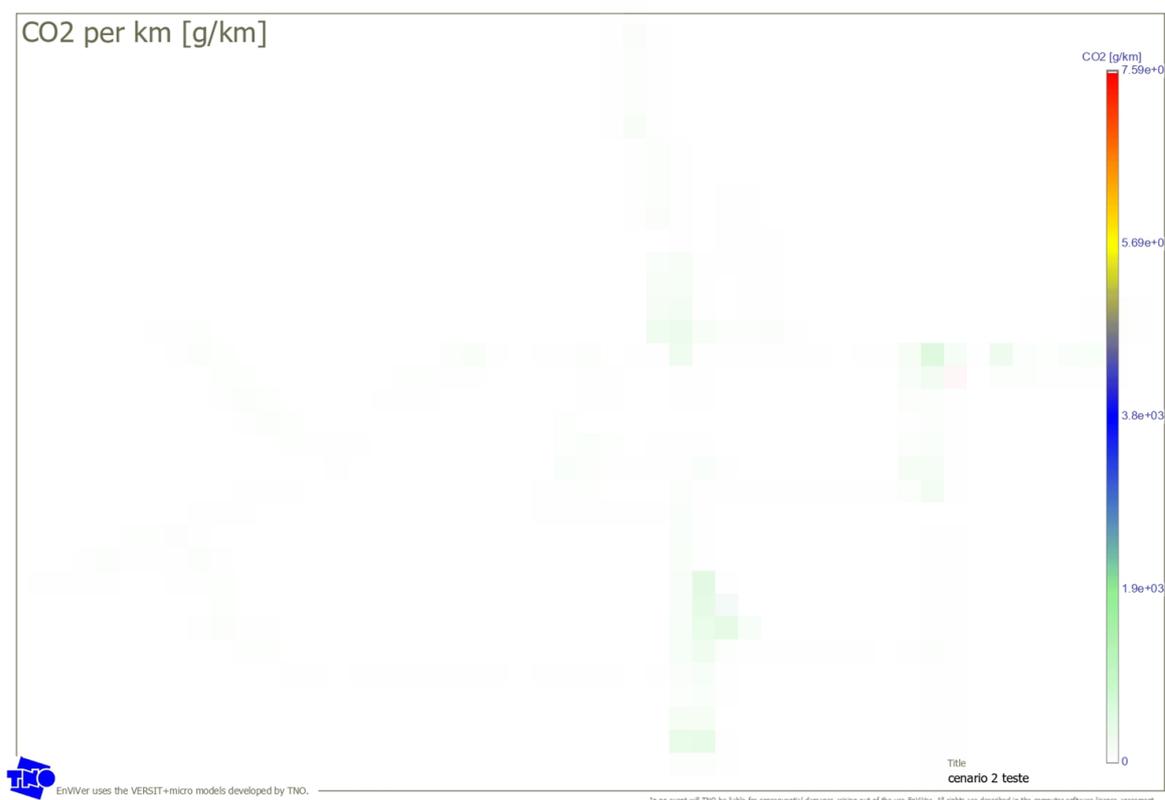


Figura 46 - Emissões de CO2 por km – Cenário 2

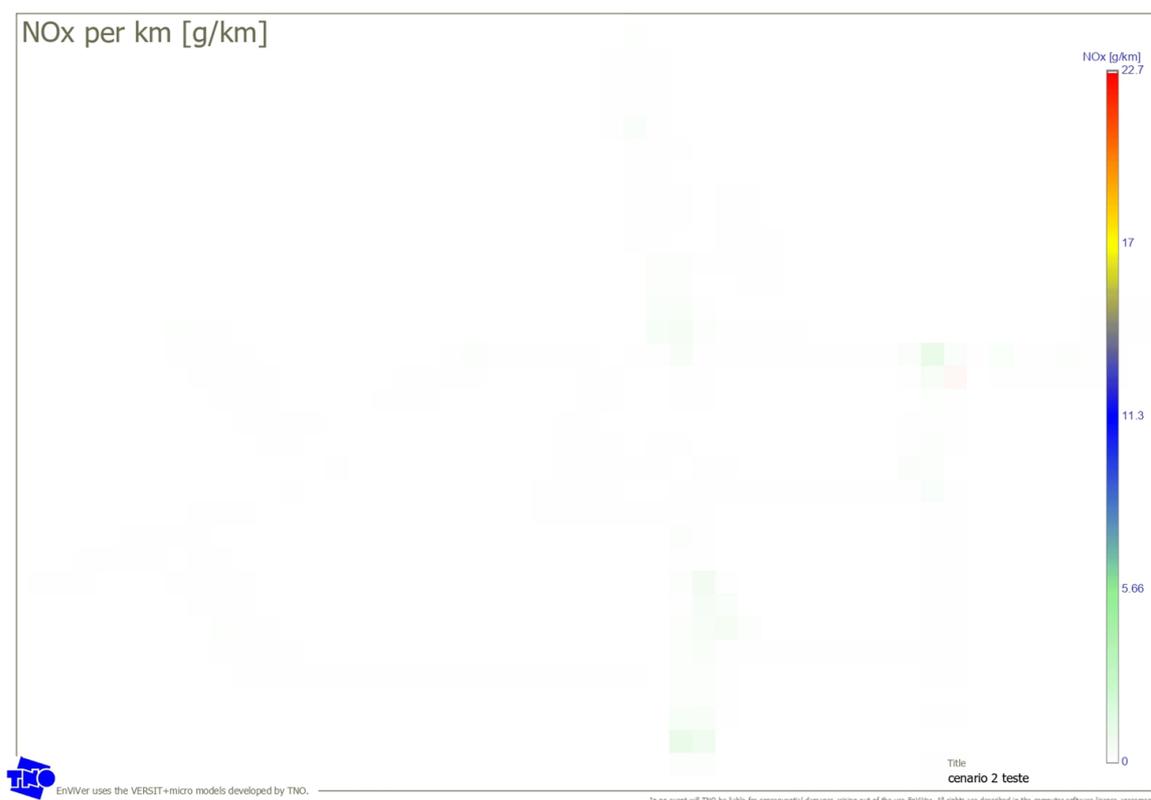


Figura 47 - Emissões de NOx por km – Cenário 2

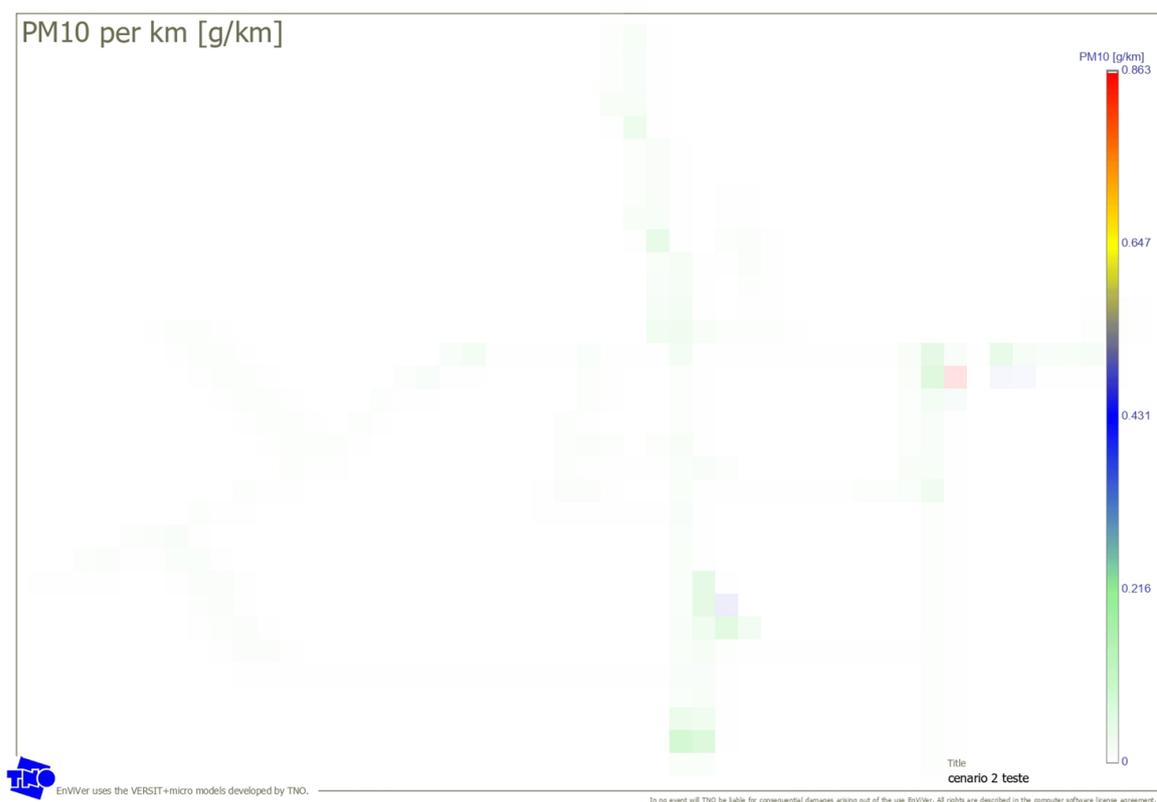


Figura 48 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 2

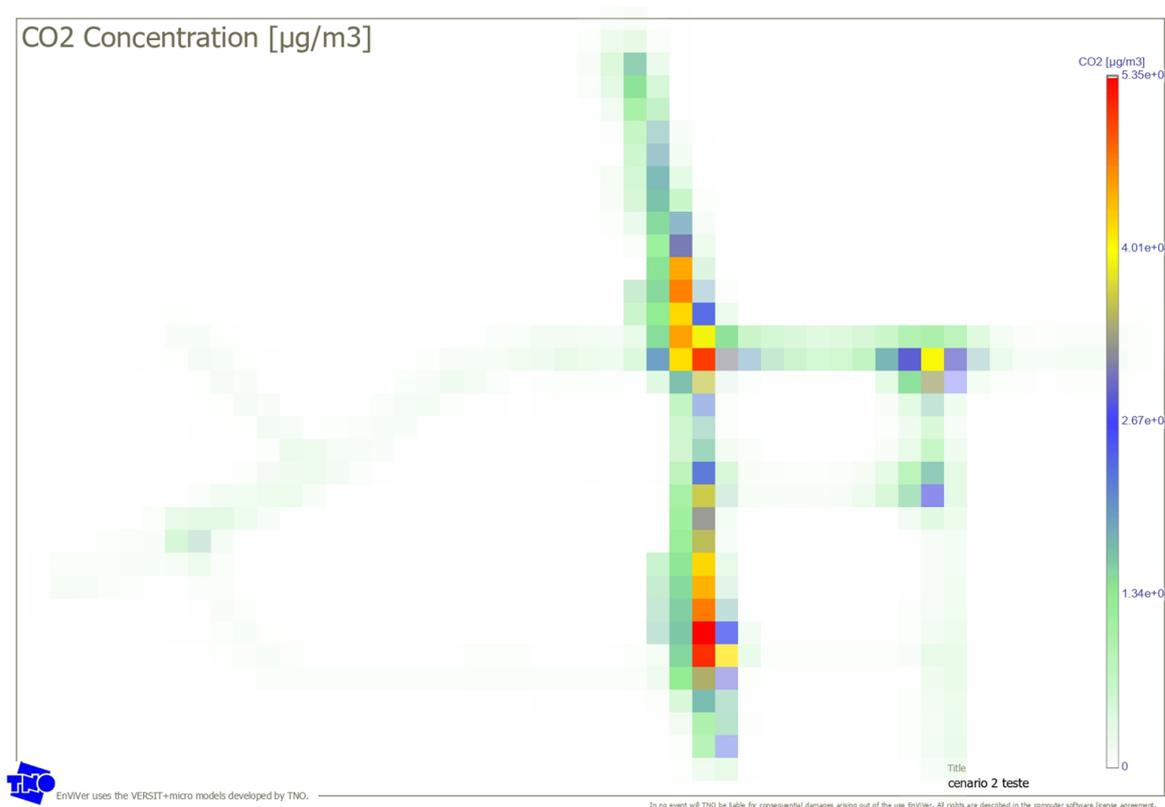


Figura 49 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 2

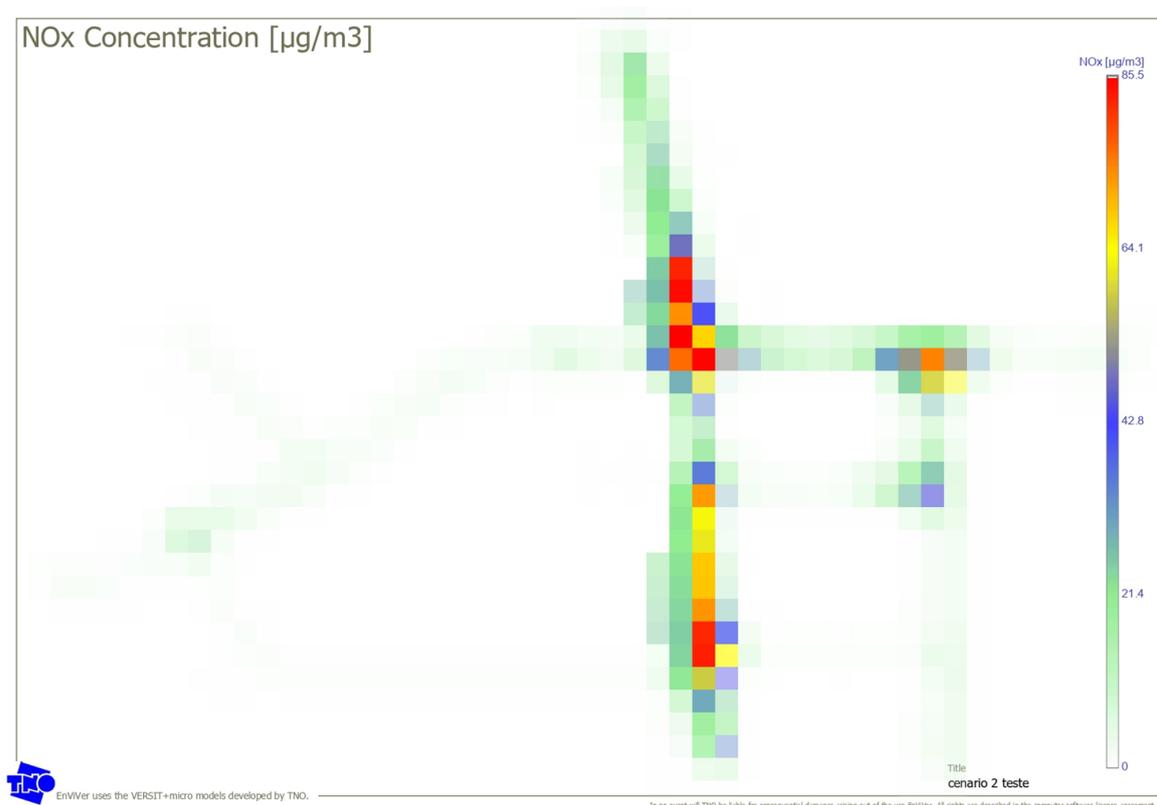


Figura 50 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 2

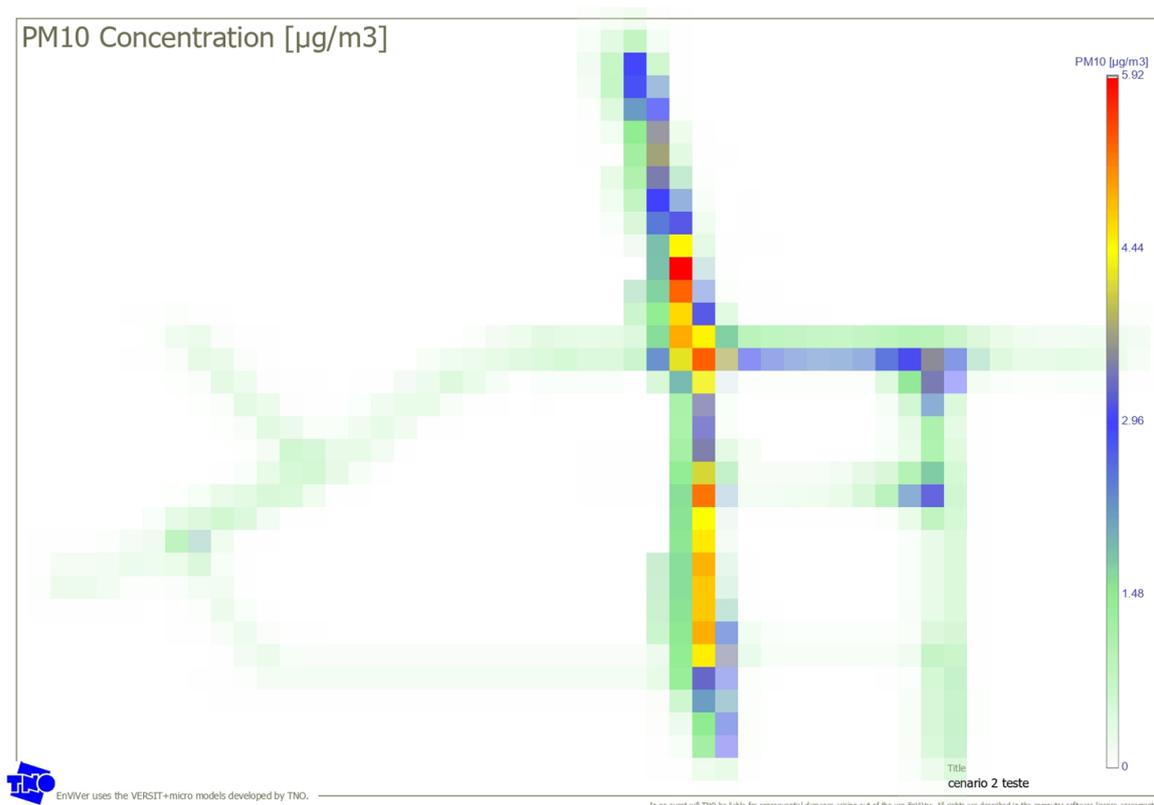


Figura 51 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 2

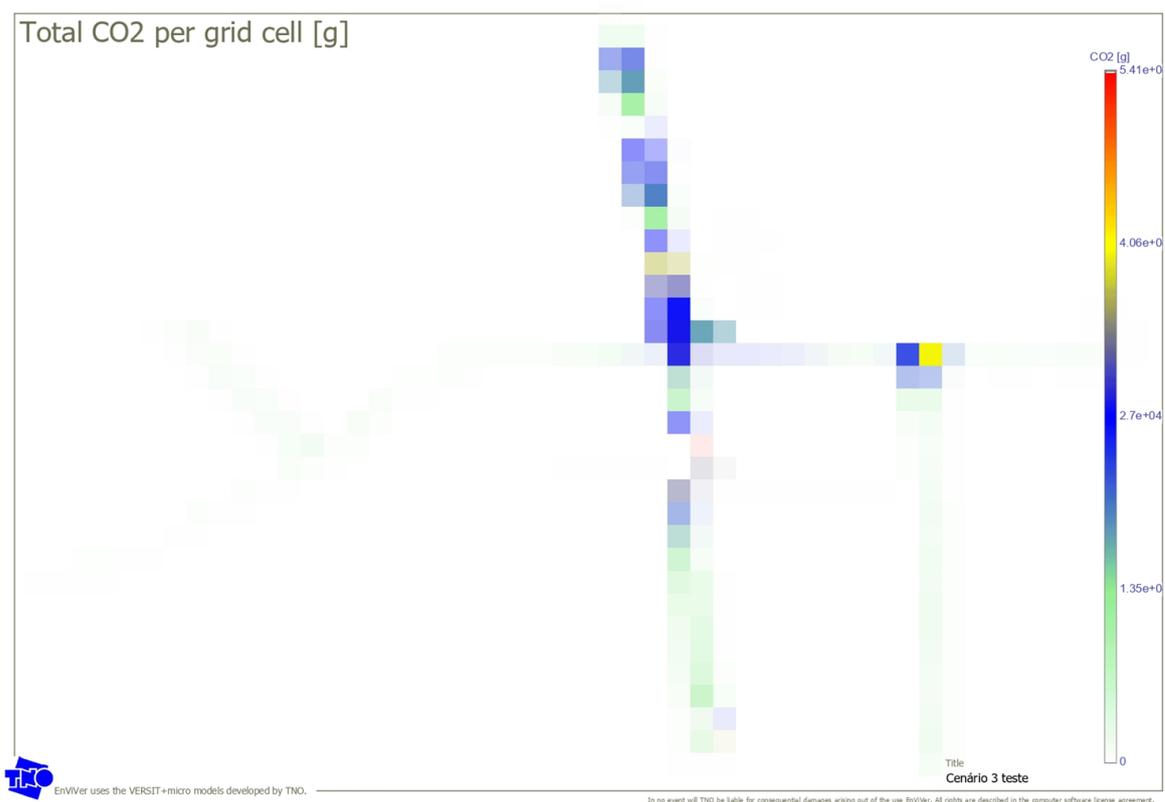


Figura 52 - Total de emissões de CO2 – Cenário 3

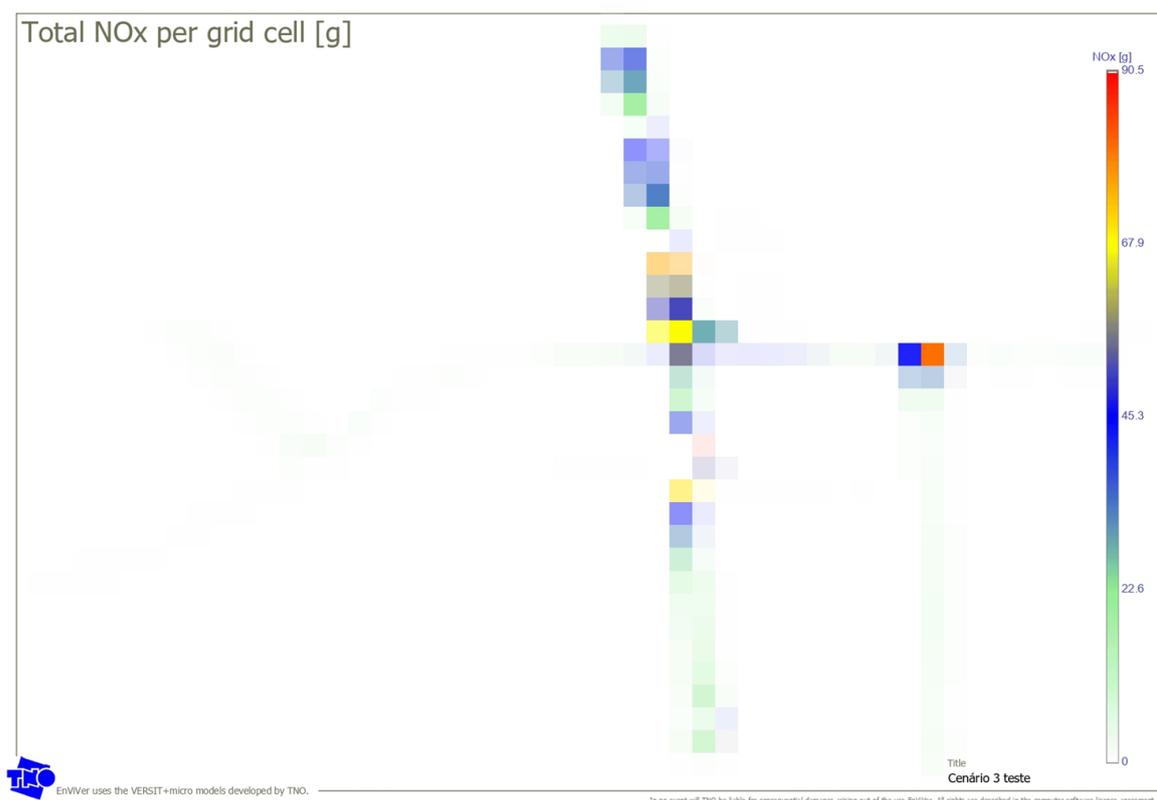


Figura 53 - Total de emissões de NOx – Cenário 3

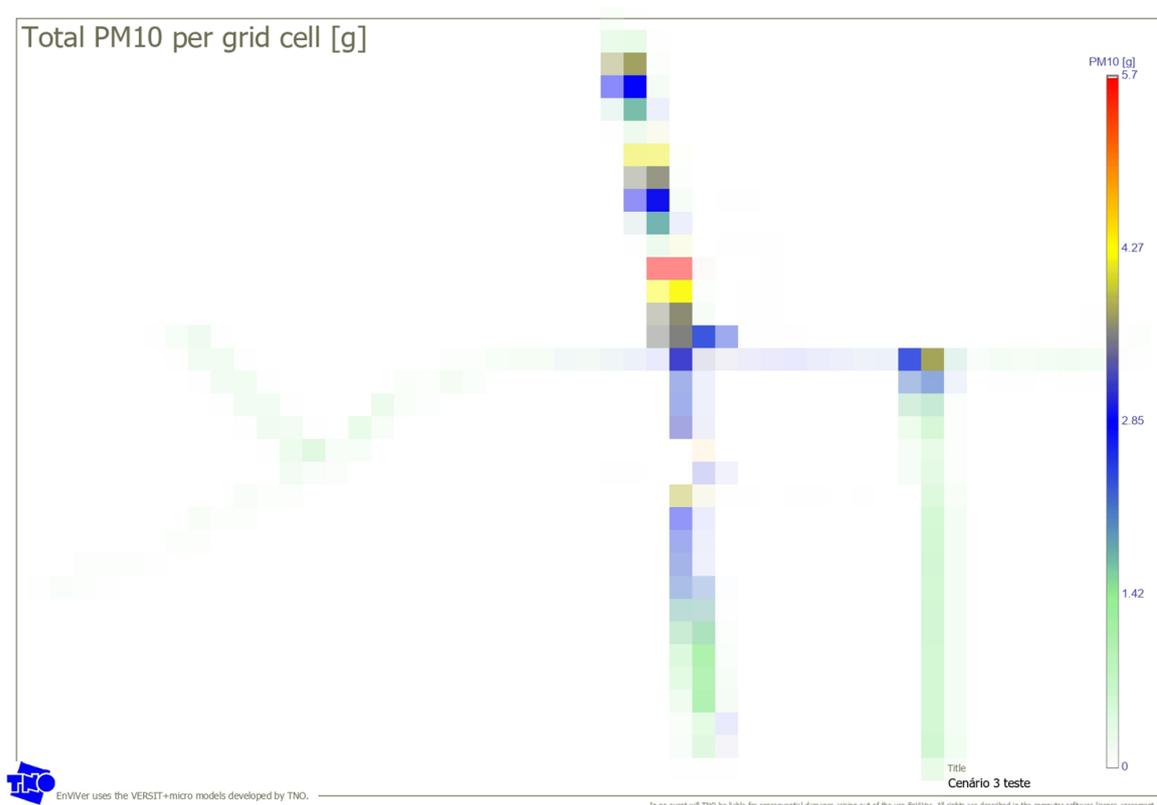


Figura 54 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 3



Figura 55 - Emissões de CO2 por km – Cenário 3

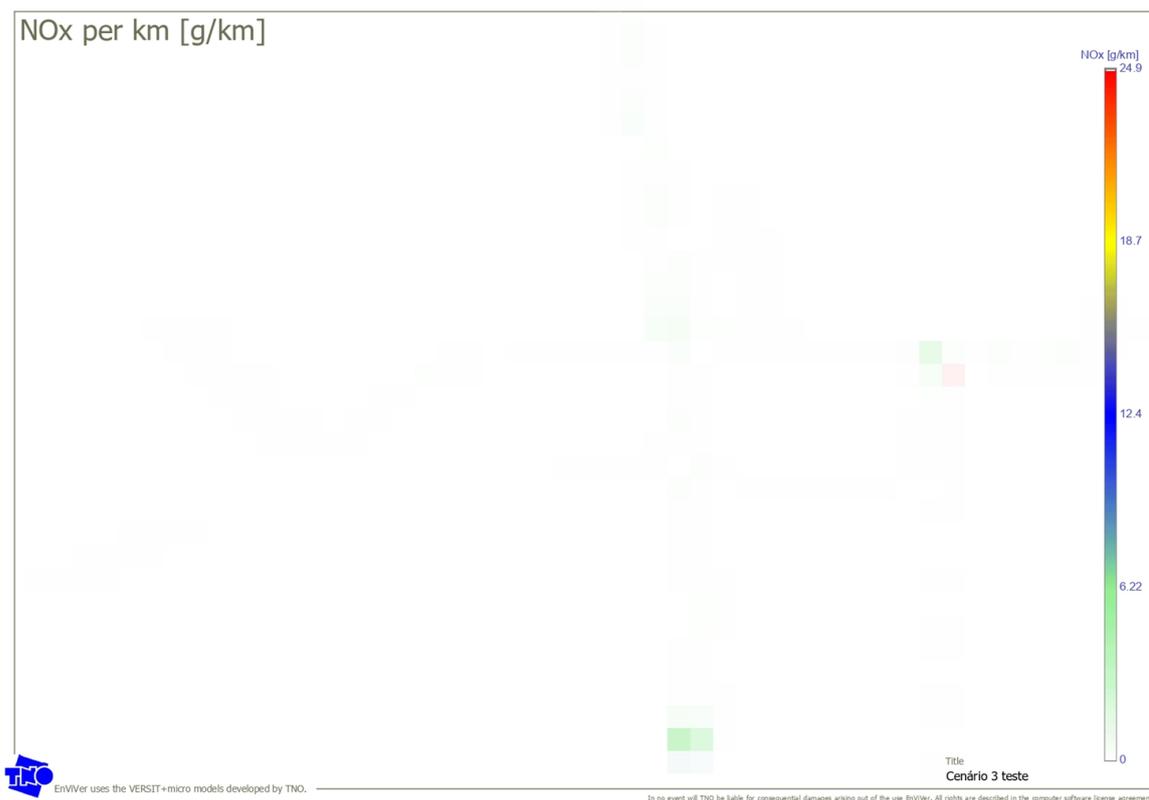


Figura 56 - Emissões de NOx por km – Cenário 3

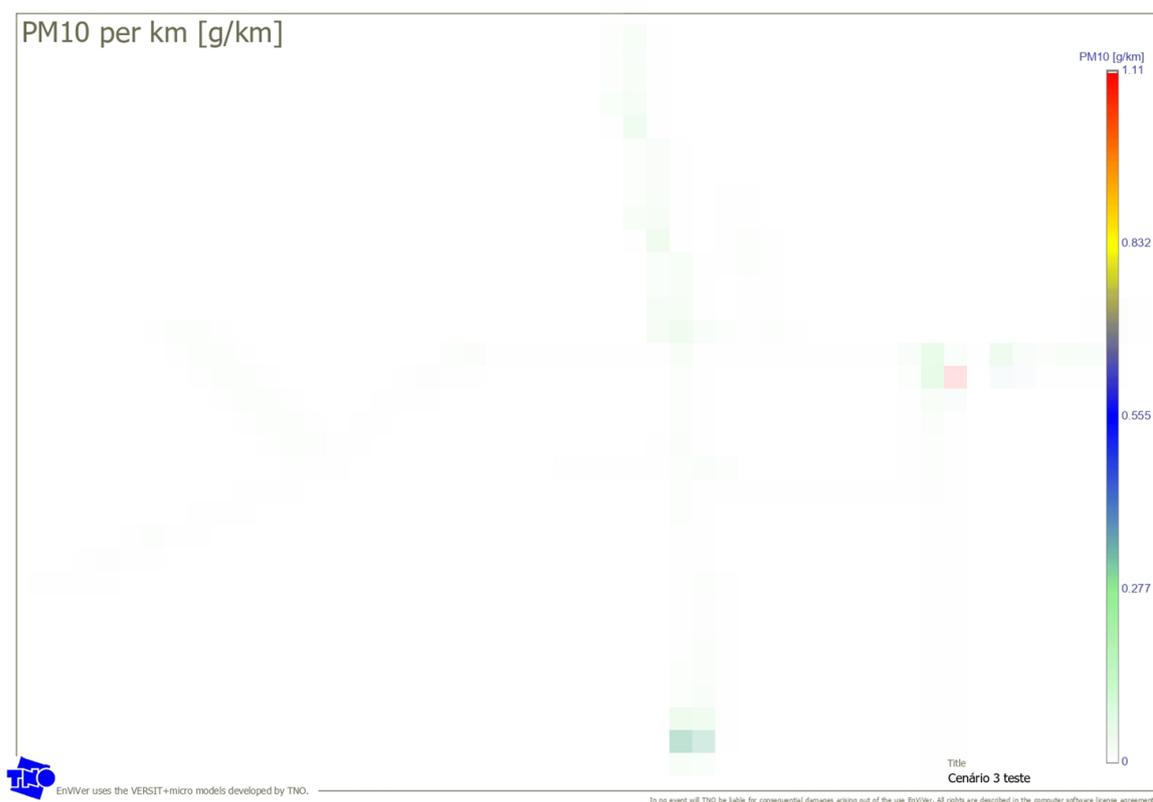


Figura 57 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 3

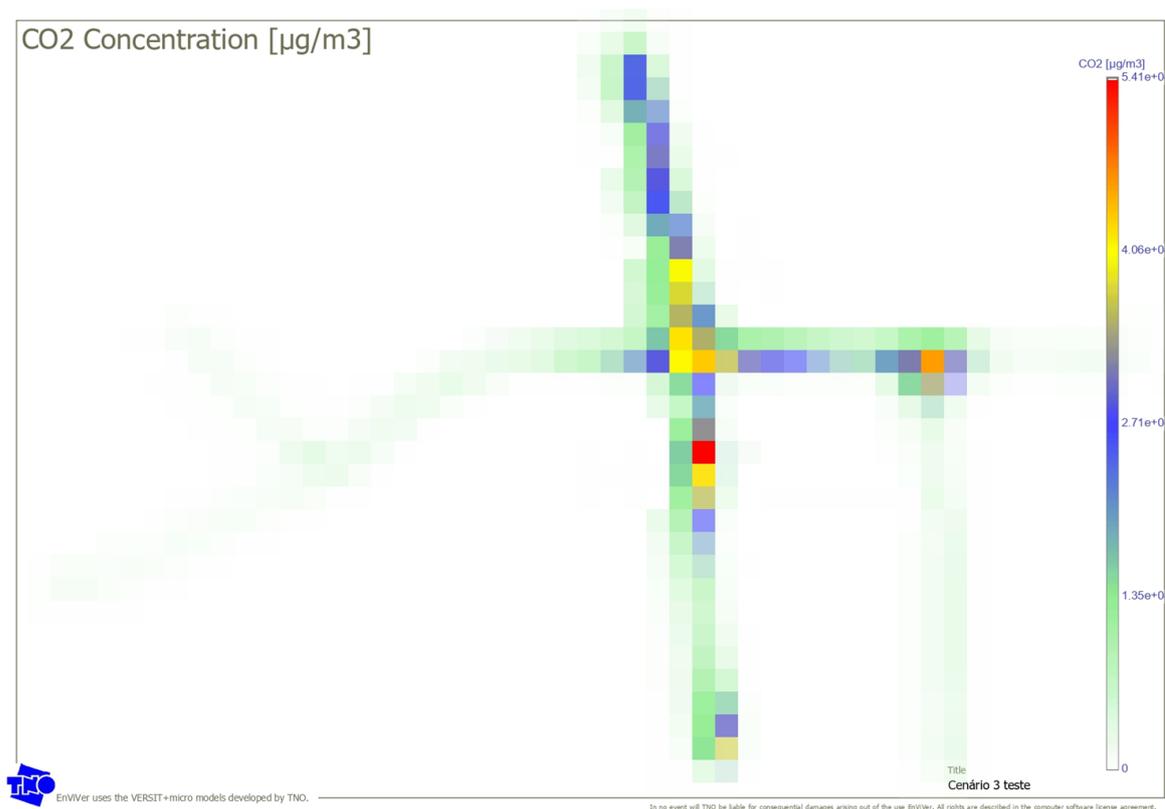


Figura 58 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 3

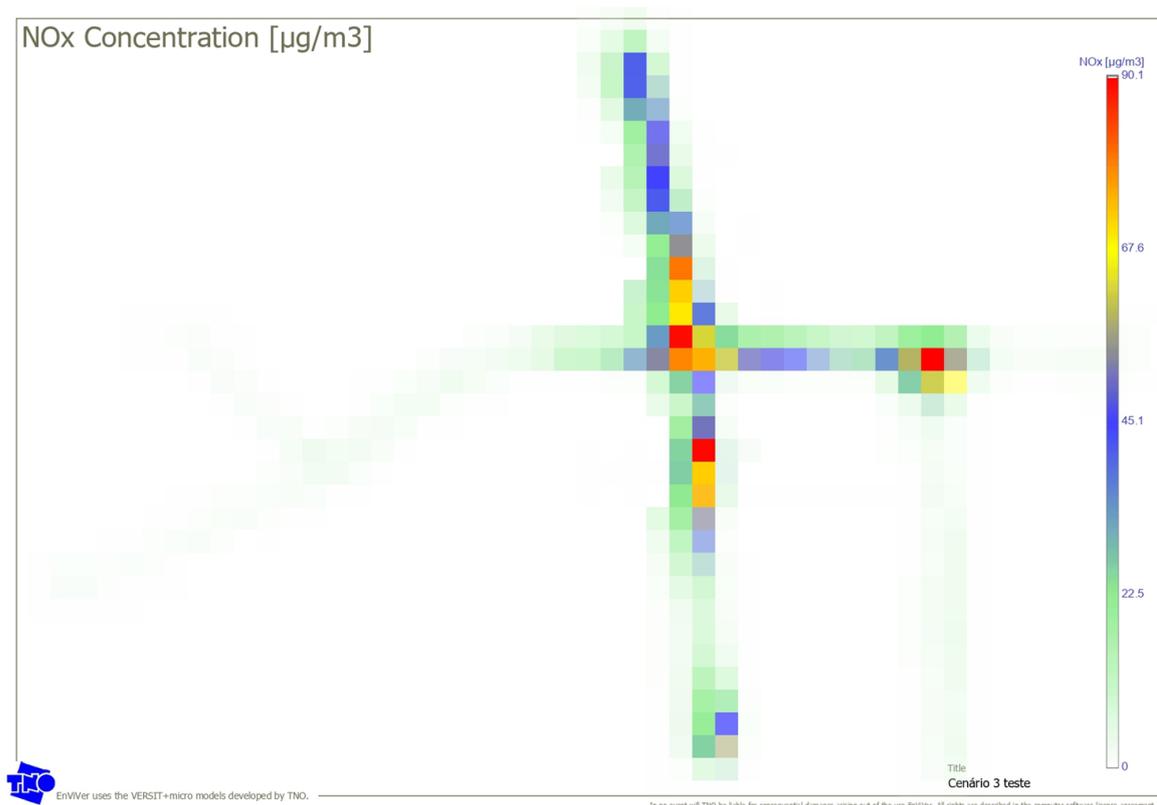


Figura 59 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 3

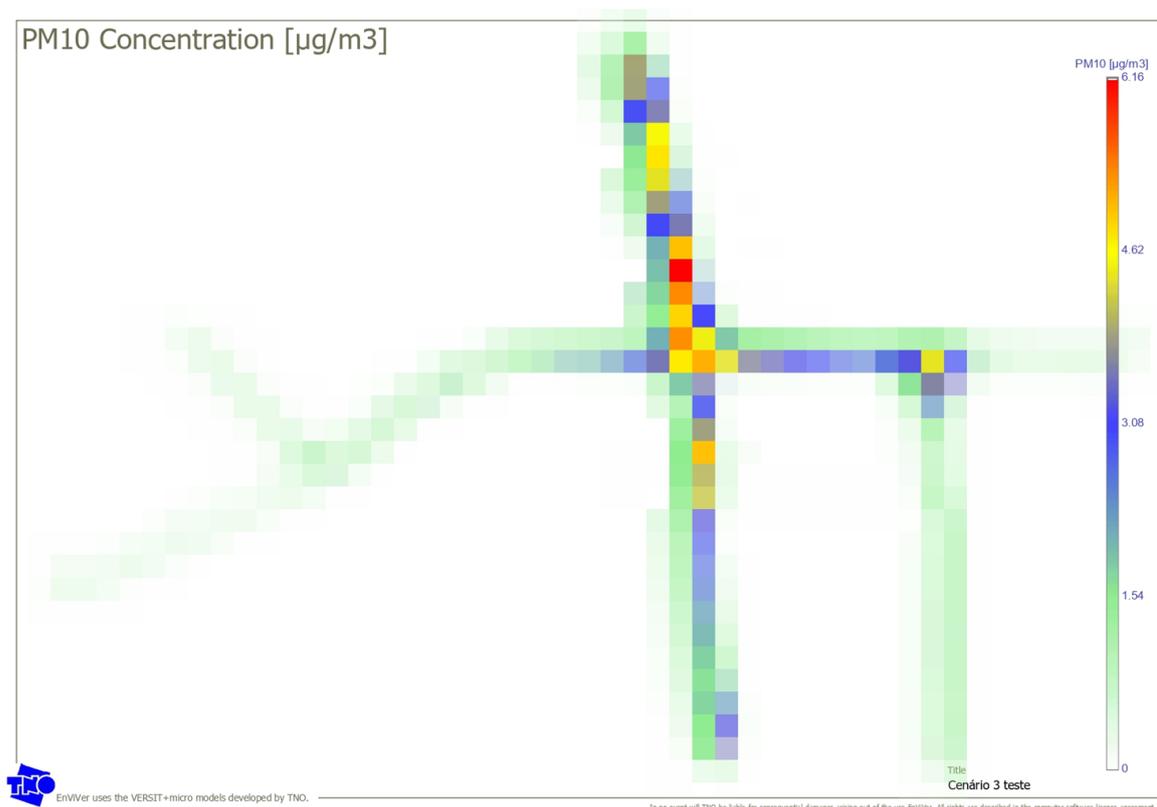


Figura 60 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 3

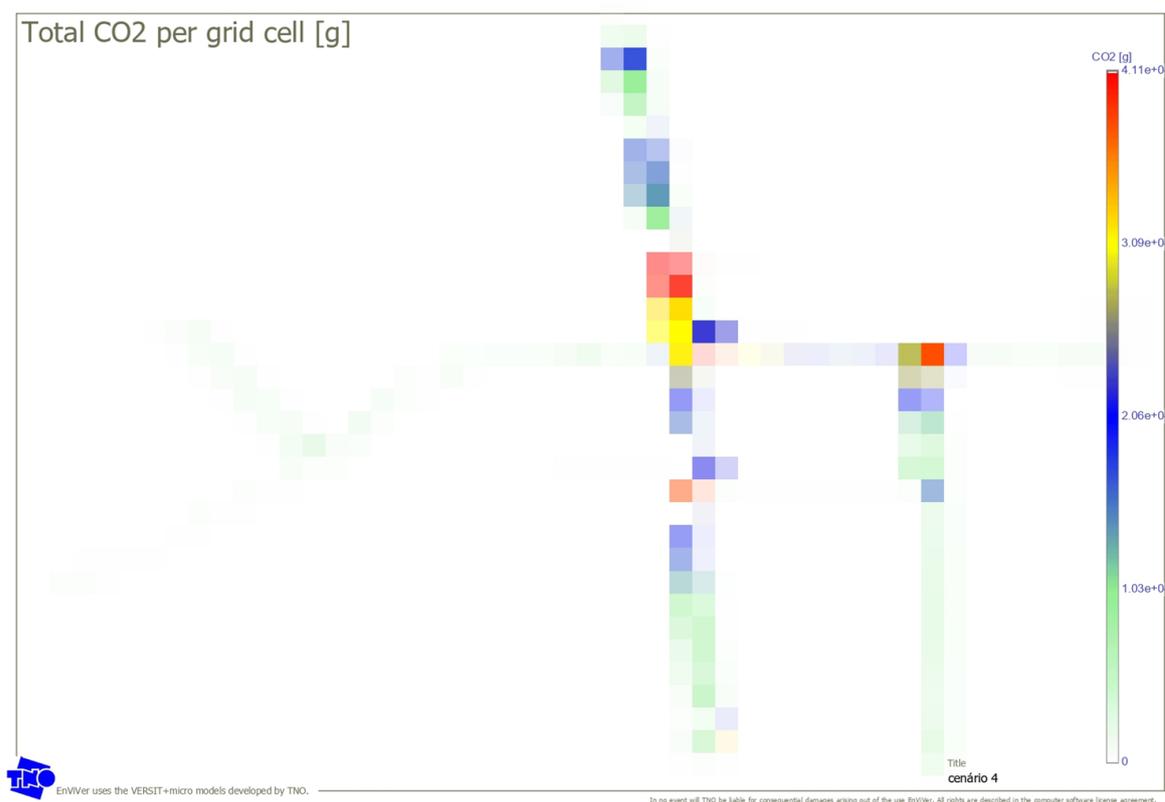


Figura 61 - Total de emissões de CO2 – Cenário 4

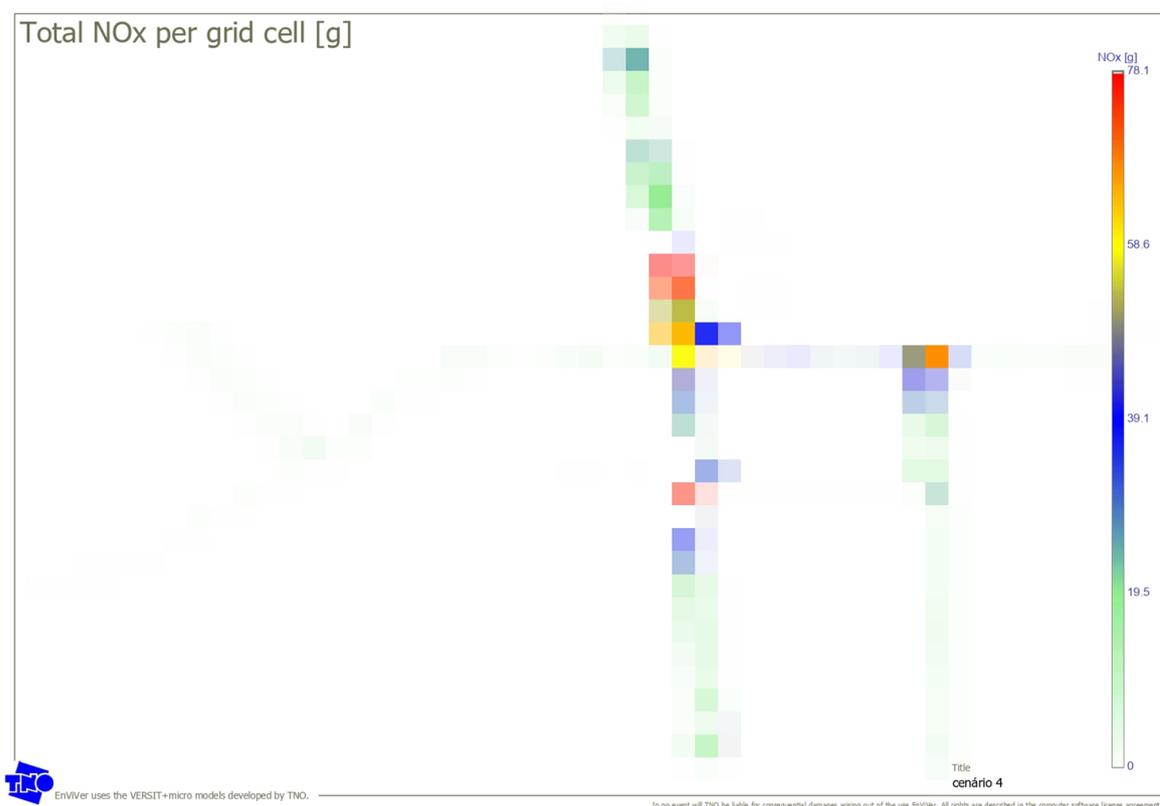


Figura 62 - Total de emissões de NOx – Cenário 4

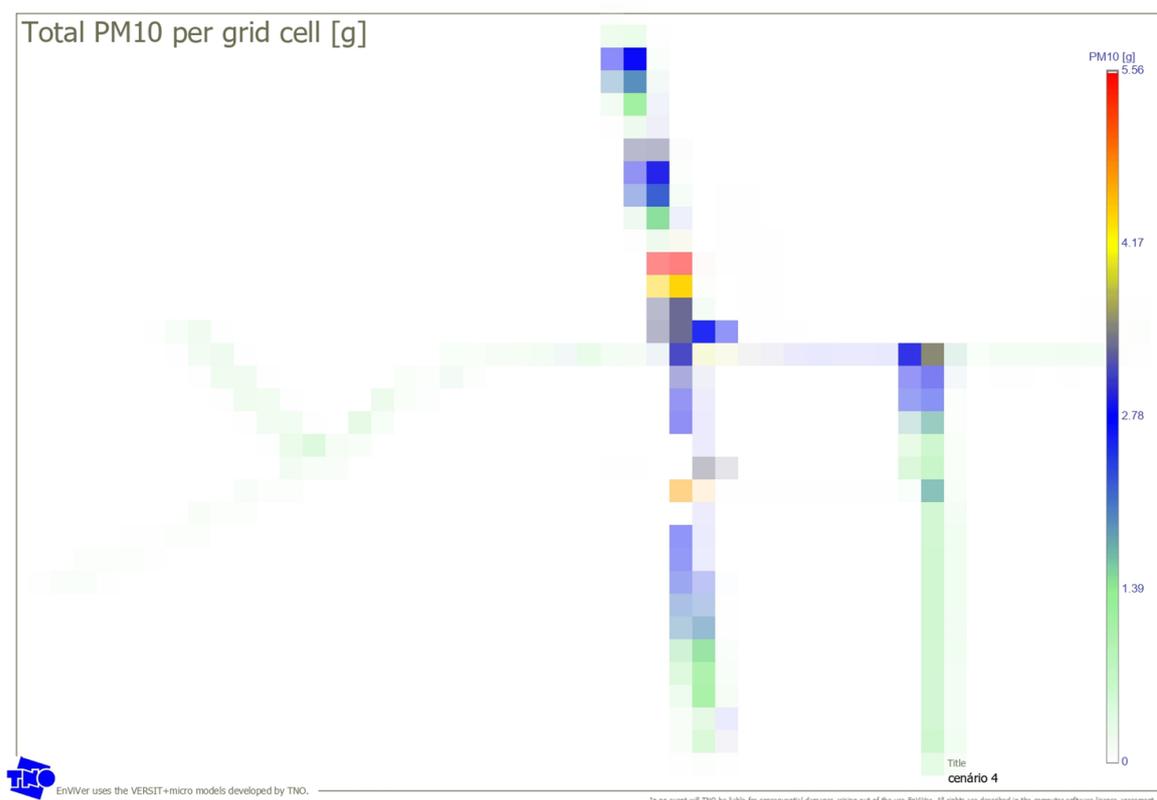


Figura 63 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 4



Figura 64 - Emissões de CO2 por km – Cenário 4

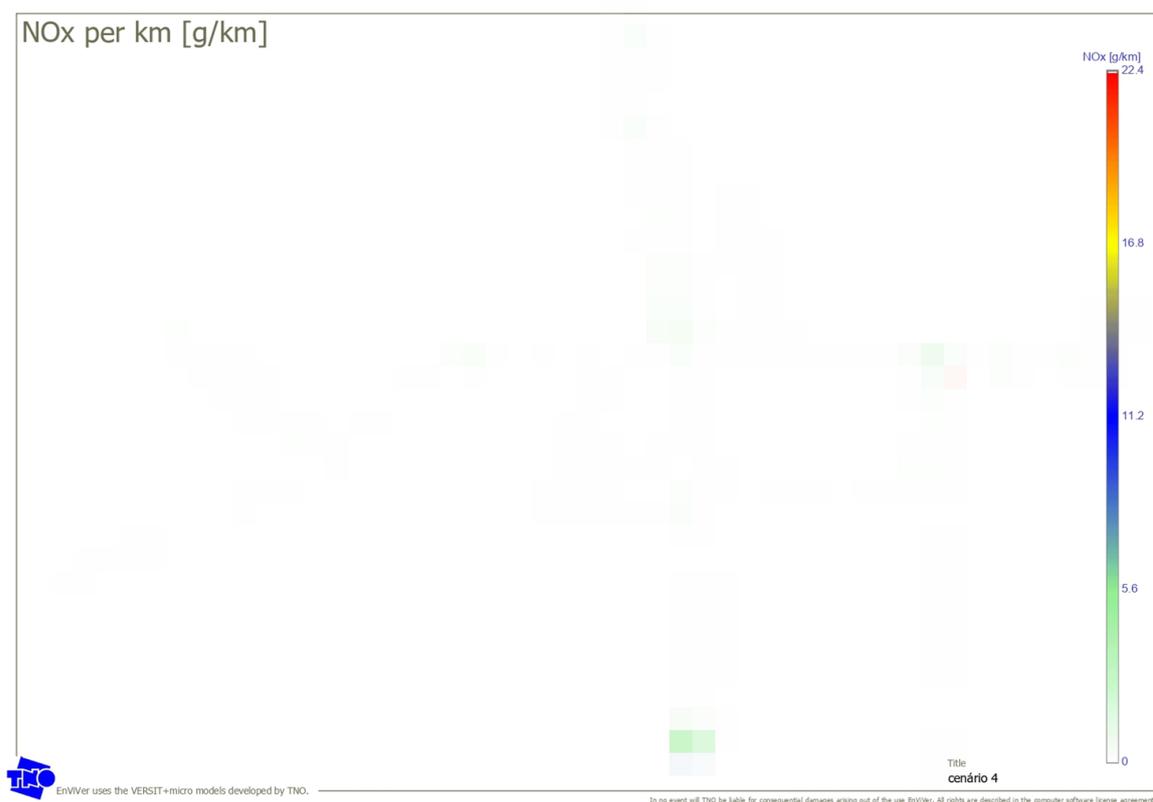


Figura 65 - Emissões de NOx por km – Cenário 4

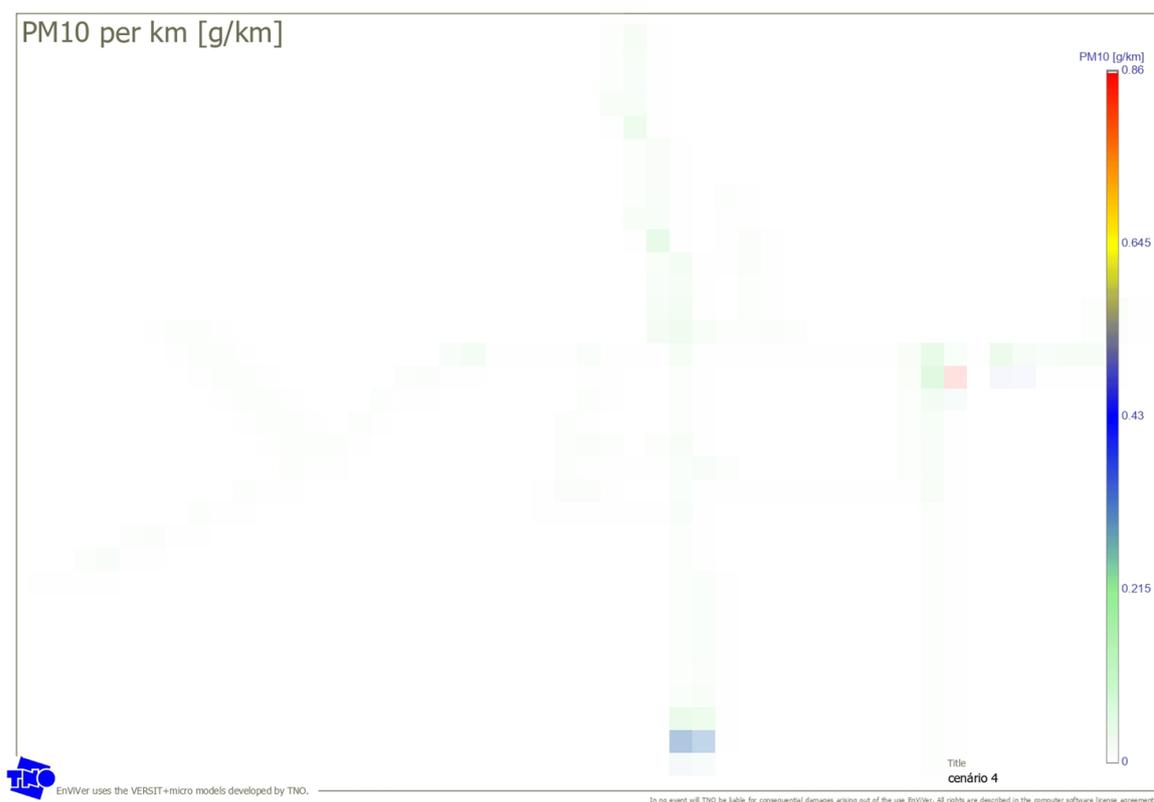


Figura 66 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 4

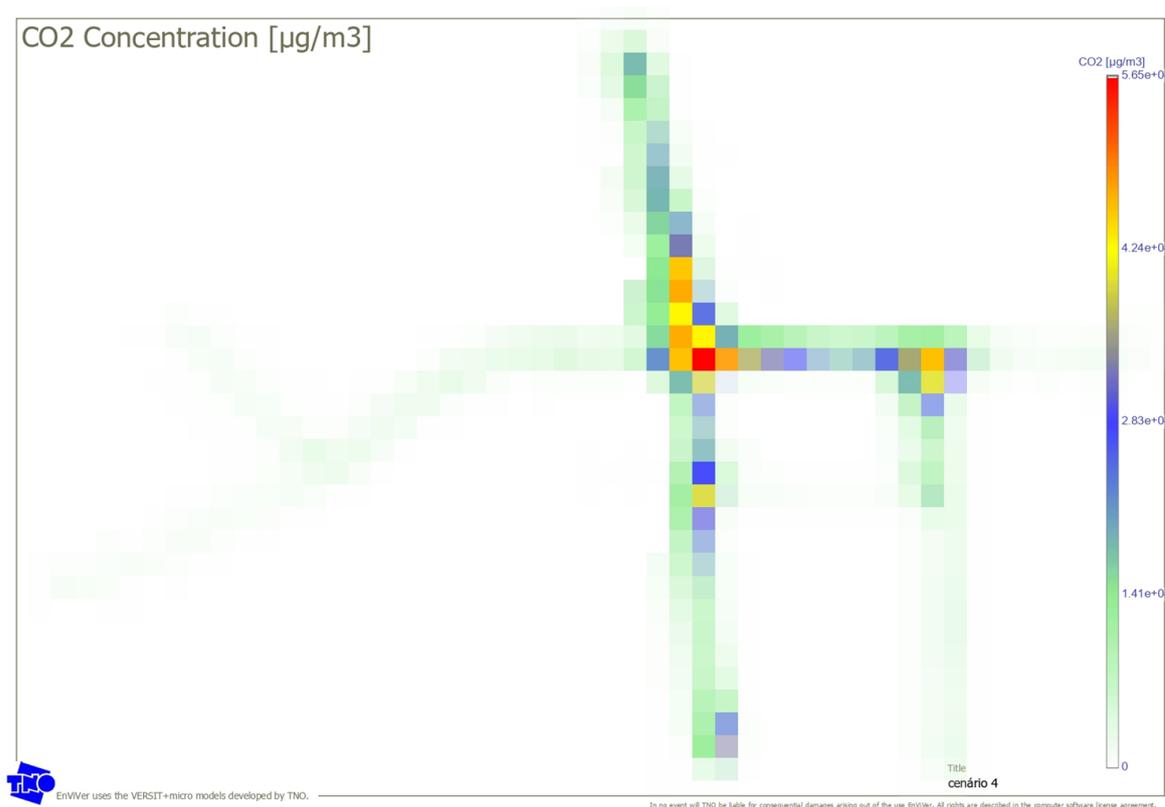


Figura 67 - Concentração das emissões de CO₂ – Cenário 4

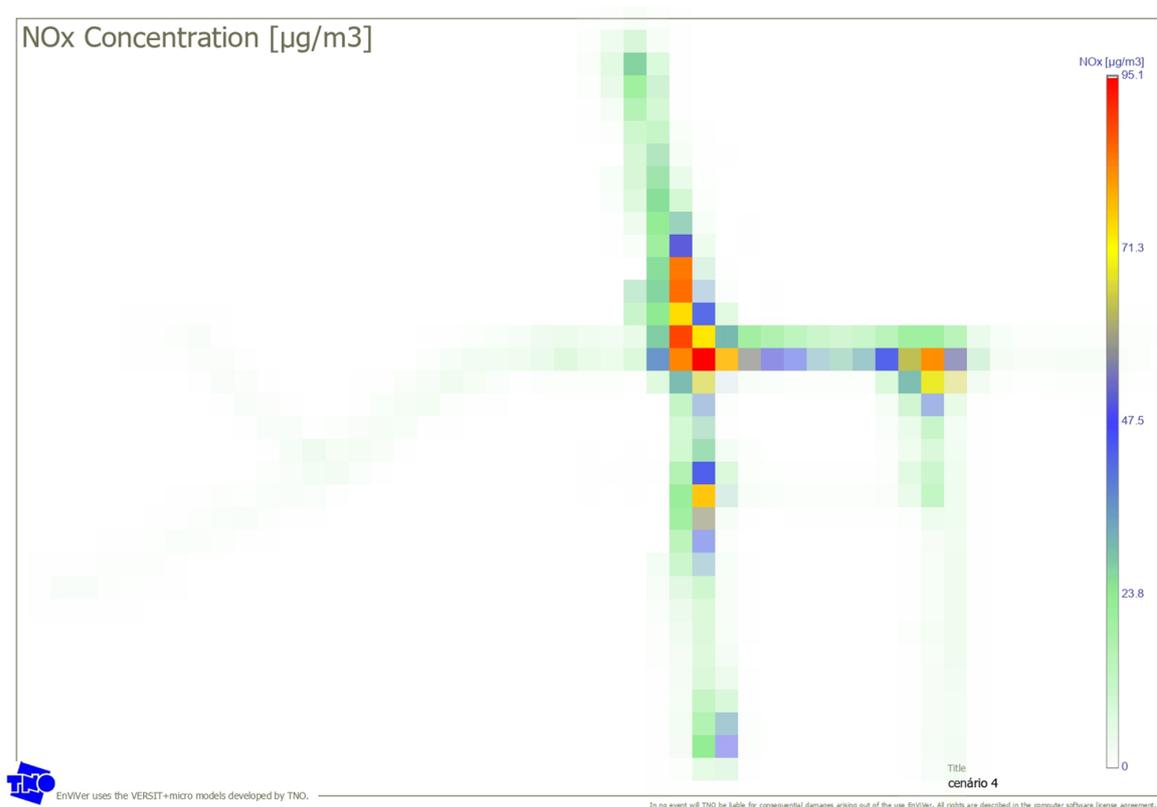


Figura 68 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 4

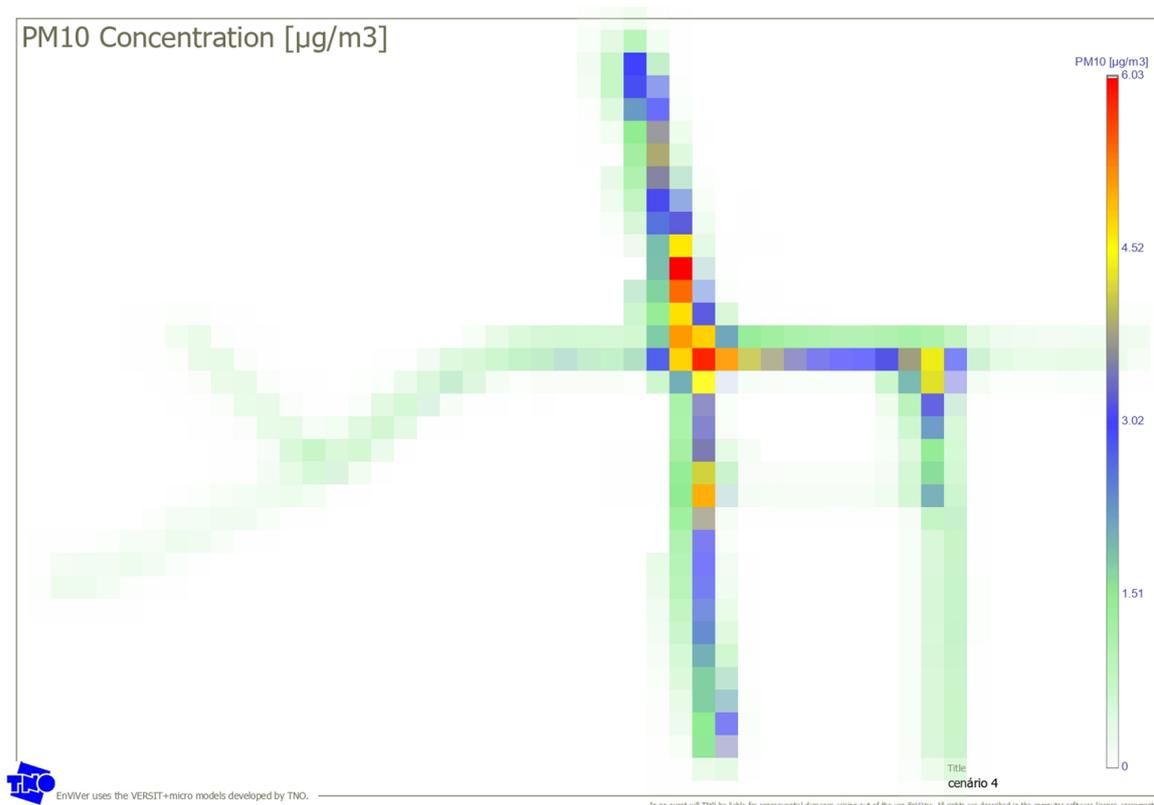


Figura 69 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 4

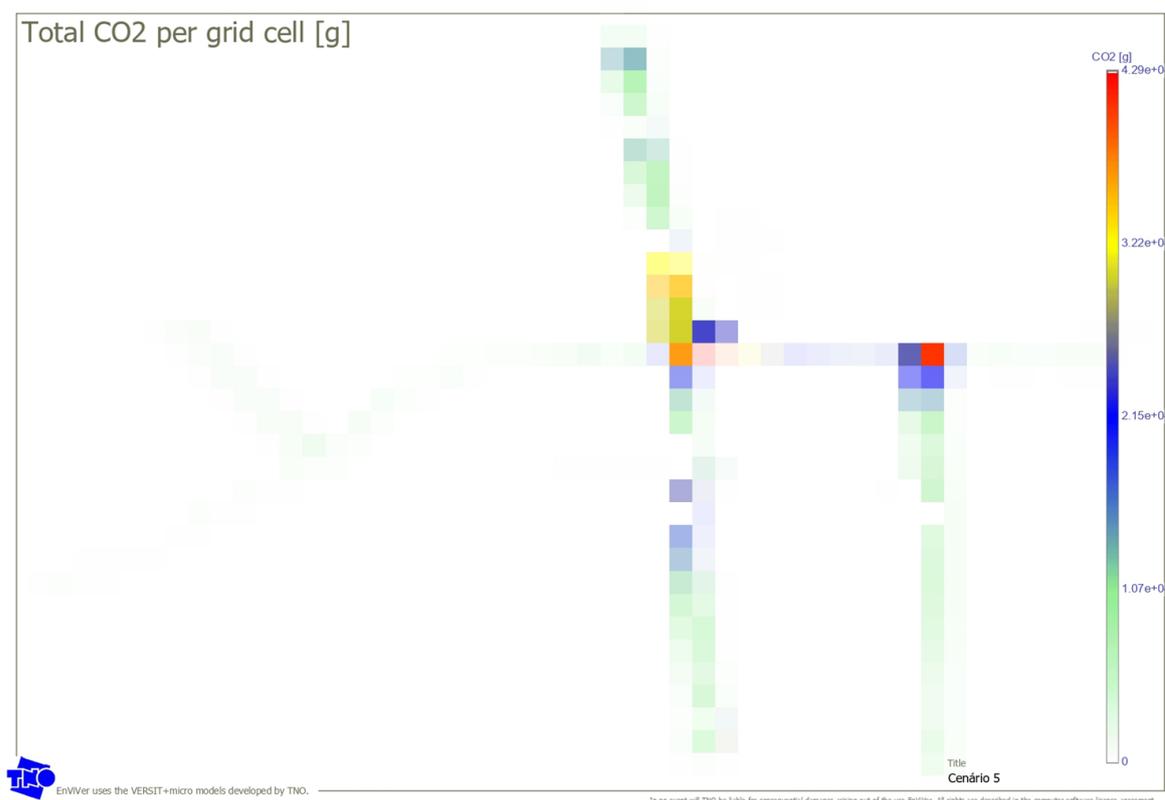


Figura 70 - Total de emissões de CO2 – Cenário 5

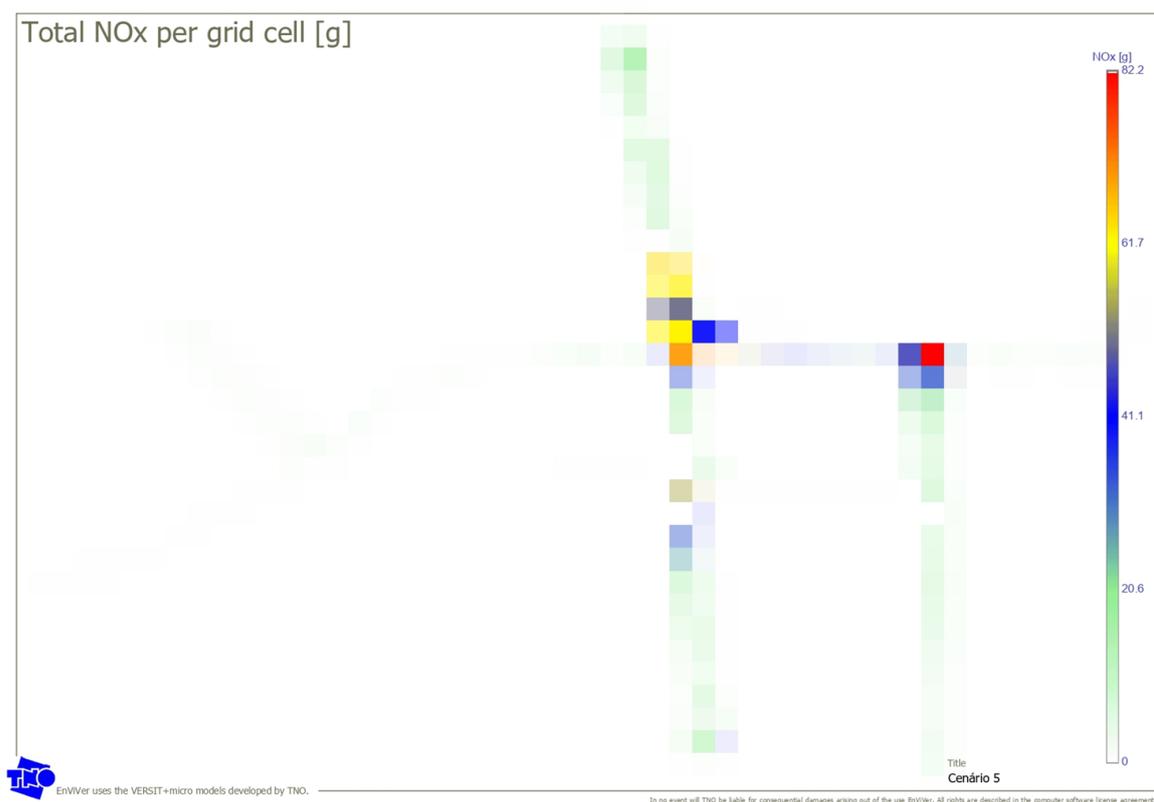


Figura 71 - Total de emissões de NOx – Cenário 5

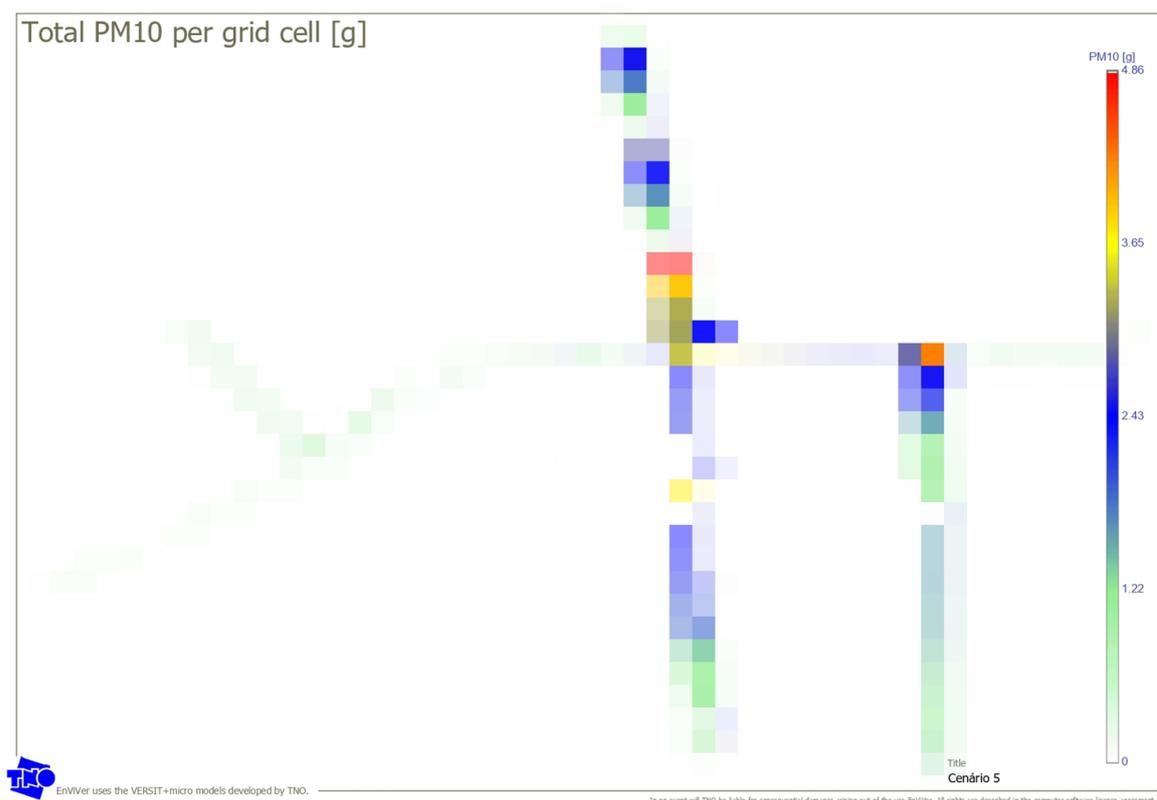


Figura 72 - Total de emissões de Material Particulado – Cenário 5



Figura 73 - Emissões de CO2 por km – Cenário 5



Figura 74 - Emissões de NOx por km – Cenário 5

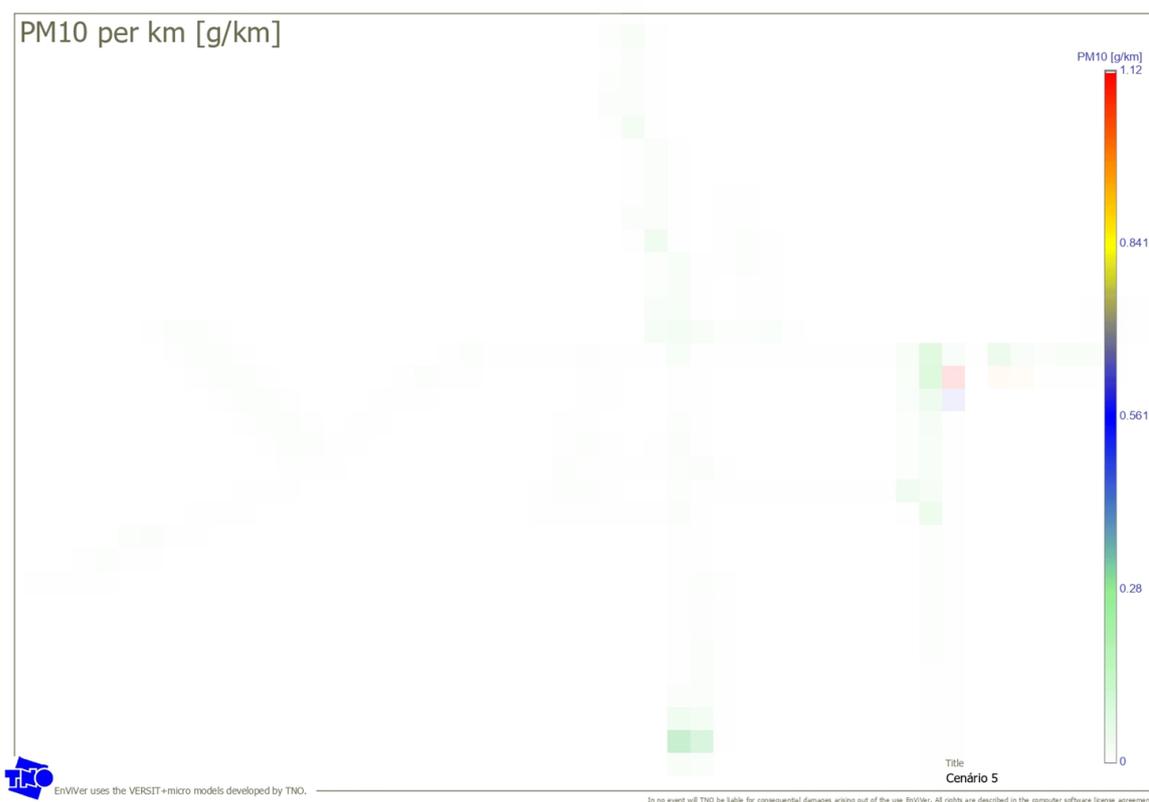


Figura 75 - Emissões de Material Particulado por km – Cenário 5

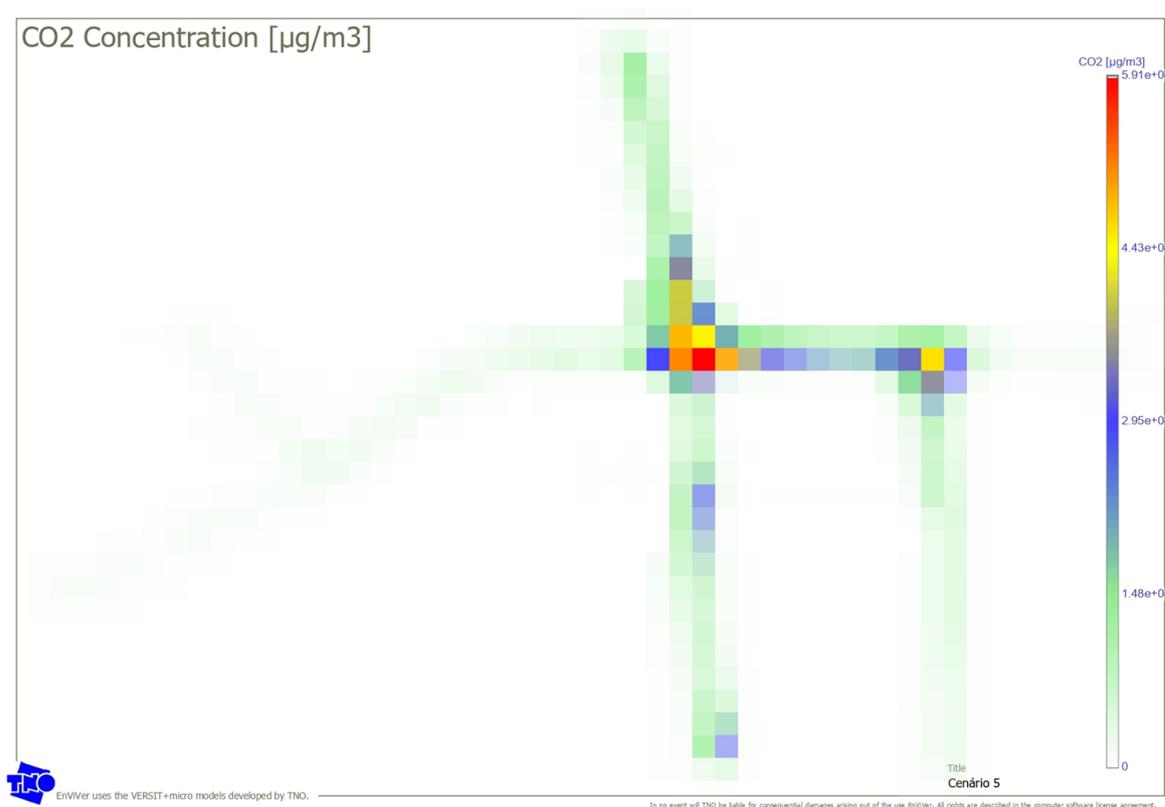


Figura 76 - Concentração das emissões de CO2 – Cenário 5

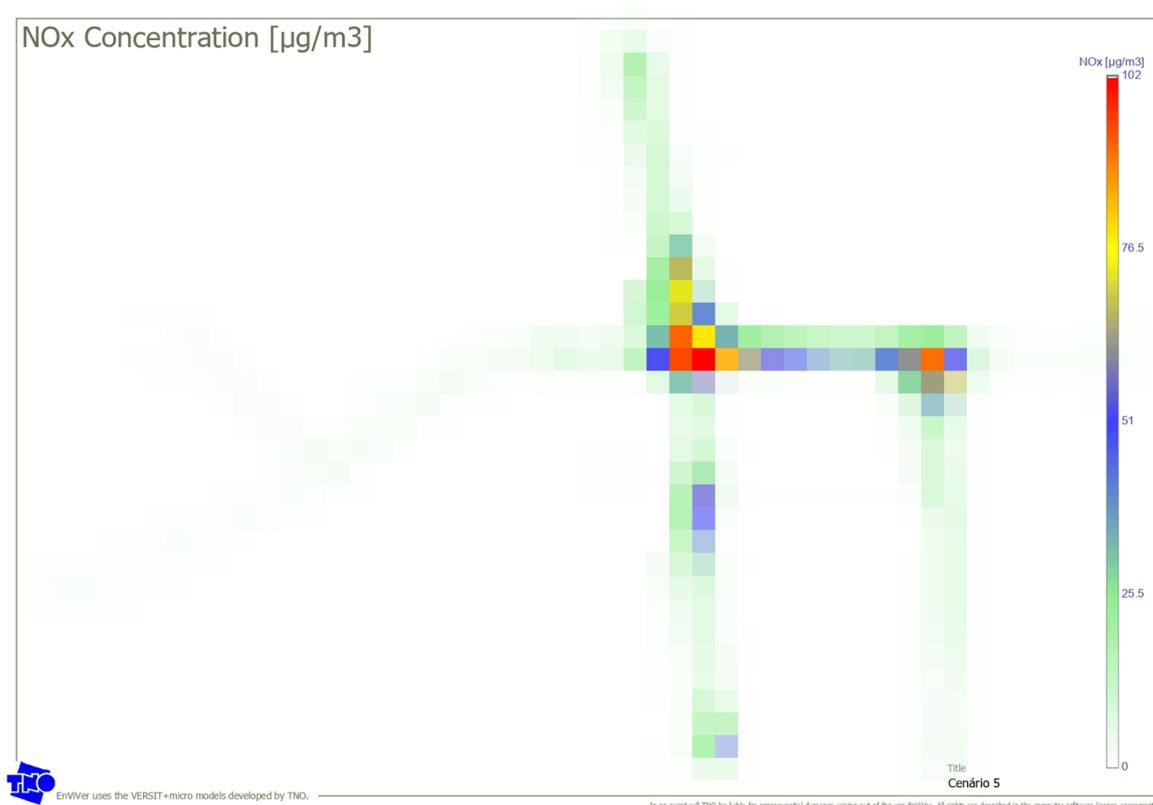


Figura 77 - Concentração das emissões de NOx – Cenário 5

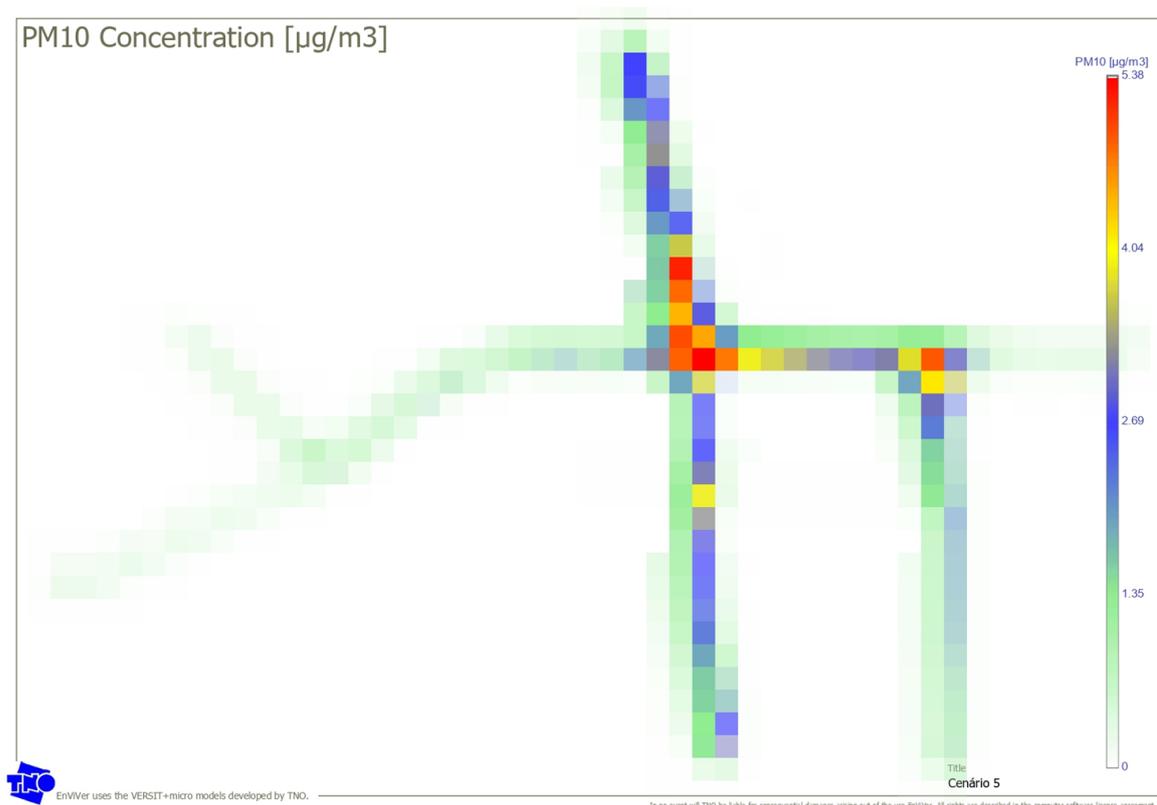


Figura 78 - Concentração das emissões de Material Particulado – Cenário 5