INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GABRIELA LAMIM

IMPACTOS DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) DO SISTEMA MODAL NA ROTA DE CARGAS PORTUÁRIAS DE SANTA CATARINA

FLORIANÓPOLIS

2023

GABRIELA LAMIM

IMPACTOS DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) DO SISTEMA MODAL NA ROTA DE CARGAS PORTUÁRIAS DE SANTA CATARINA

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Mestre em Clima e Ambiente.

Orientador: Cássio Aurélio Suski

Coorientadora: Débora Souza Alvim

FLORIANÓPOLIS

2023

CDD 551.5
L231i

Lamim, Gabriela
Impactos da emissão de gases de efeito estufa (GEE) do sistema modal na rota de cargas portuárias de Santa Catarina - [DIS] / Gabriela Lamim; orientação de Cássio Aurélio Suski. Coorientação de Débora Souza Alvim – Florianópolis, 2023.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Emissões de gases de efeito estufa. 2. Inventário de emissões. 3. WRF-CHEM. 4. Transporte rodoviário. 5. Transporte ferroviário I. Suski, Cássio Aurélio. II. Alvim, Débora Souza. III. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

Aluno (a): Gabriela Lamim

Titulo:	IMPACTOS DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) DO SISTEMA MODAL NA ROTA DE CARGAS PORTUÁRIAS DE SANTA CATARINA

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr(a). *Cássio Aurélio Suski*

Documento assinado digitalmente
gov.br
CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 11/09/2023 10:08:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador(a) / Presidente / IFSC / Itajaí – SC
Participação: (x) Presencial ( ) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). *Dirceu Herdies*

Documento assinado digitalmente
gov.br
DIRCEU LUIS HERDIES
Data: 08/09/2023 17:27:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis – SC/ INPE
Participação: ( ) Presencial (x) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). *Mário Francisco Leal de Quadro*

Documento assinado digitalmente
IFSC
MARIO FRANCISCO LEAL DE QUADRO
Data: 08/09/2023 12:09:11-0300
CPF: 539.913.030-00
Verifique as assinaturas em https://v.ifsc.edu.br

Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC
Participação: ( ) Presencial (x) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Dr(a). *Luana Basso*

Avaliador(a) Externo / Max Planck Institute for Biogeochemistry – Jena/Alemanha
Participação: ( ) Presencial (x) Videoconferência
(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) *unanimidade*

Itajaí, 01 de setembro de 2023.

Meu pequeno Arthur, você foi a força e a inspiração para os dias em que pensei em desistir de tudo. Que você persista para realizar cada um de seus sonhos e que saiba que o conhecimento é a maior riqueza que podemos ter, ele pode nos ajudar a mudar o mundo a nossa volta. Mamãe sempre vai estar aqui para te apoiar. Com amor e carinho, Mamãe Gabi.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho, me dar forças e ter me proporcionado essa incrível conquista.

Ao meu Pai Luiz, que se foi muito cedo, mas que nos ensinou desde cedo a importância da educação. Lá do céu ele me iluminou nessa e tantas outras caminhadas.

A minha mãe Rose, que é inspiração diária para todos nós. Mãe, aqui faltaria espaço para agradecer o que você é em nossas vidas. Obrigada por ser sempre forte, me apoiar e ser o nosso alicerce.

Ao meu pequeno Arthur e meu esposo Marcelo, que foram compreensivos e incentivadores nesse processo. Papai e vovó foram essenciais nos momentos que precisava escrever e que um pequeno queria atenção e brincadeira. Arthur o momento de falar que vão falar que a “mamãe é campeã” chegou.

A minha chefe e amiga Kenia, por tanto apoio para que essa dissertação pudesse ser concluída. Cada conselho, ajuda e palavra me levaram a conclusão deste trabalho. Que bom que a vida me colocou no teu caminho.

Ao meu orientador Cássio e Co-orientadora Débora, por serem participativos em neste trabalho, construindo, pesquisando e discutindo todas as etapas. Obrigada por acreditarem e mim e por quererem sempre mais.

Ao André e Dirceu do INPE, por estarem gentilmente disponíveis toda sexta-feira conosco, ensinado e trocando ideias. Meu trabalho ficou muito mais enriquecedor com o apoio e conhecimento de vocês. Fico extremamente lisonjeada por ter profissionais incríveis que contribuíram com este estudo.

A todos os meus amigos de mestrado, pela troca de experiências e mensagens de força que trocamos nesses últimos tempos.

“Os sonhos são como uma bússola, indicando os caminhos que seguiremos e as metas que queremos alcançar. São eles que nos impulsionam, nos fortalecem e nos permitem cresce”.

Augusto Cury

RESUMO

As mudanças climáticas têm se intensificado nas últimas décadas em virtude do aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes, principalmente, de atividades antrópicas. O setor de transporte é um dos responsáveis pelo aumento destas concentrações em virtude da queima incompleta de combustíveis fósseis na utilização dos diferentes modais, como o rodoviário e ferroviário. No entanto, a importância destes para o escoamento da produção brasileira, importação de produtos, bem como demais necessidades humanas e o desenvolvimento é evidente. Diante disso, o presente estudo analisou os impactos da emissão de GEE dos sistemas modais rodoviário e ferroviário na rota de cargas portuárias no Estado de Santa Catarina. Para tanto, foram utilizados dados de movimentação para os portos catarinenses, para os modais rodoviário e ferroviário, referente ao ano de 2020 e analisados por meio da utilização da ferramenta do Protocolo Brasileiro de Gases de Efeito Estufa - GHG Protocol, na versão 2022, bem como o modelo WRF-Chem. Por meio da ferramenta GHG Protocol foram analisados os dados base e outros cinco cenários, com diferentes incrementos que incentivam a ampliação do uso de ferroviárias como estratégia na redução de emissões. Como resultados, observou-se menores emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) quando utilizado o modal ferroviário, em comparação com o rodoviário, se comparado o cenário 5 com o atual, ocorrendo uma redução de 43% nas emissões de GEE. O setor alimentar foi o que apresentou maior representatividade em todos os cenários, com emissão de 217.009,92 tCO_{2e} no cenário atual, seguido pelo setor de máquinas, aparelhos e materiais elétricos com 60.315,08 tCO_{2e}, de máquinas e equipamentos com 58.449,66 tCO_{2e} e de madeira com 3.264.078,89 tCO_{2e}. Em relação ao WRF-Chem foi possível observar a emissão e dispersão da concentração de CO_2 ao longo do Estado de Santa Catarina, considerando o cenário atual. Com o resultado da simulação foi possível observar que as regiões litorânea, médio vale do Itajaí e oeste possuem maior predominância de emissão. Em relação a concentração de CO_2 foi possível observar que o período noturno foi o que apresentou maiores concentrações, em virtude da Camada Limite Noturna (CLN). Tais constatações deixam claro a importância de incentivar o planejamento estratégico e investimentos para promover a intermodalidade e otimizar a eficiência logística em Santa Catarina, através da diversificação da matriz de transporte, como forma de promover a sustentabilidade e mitigação dos efeitos climáticos.

Palavras-Chave: Emissões de Gases de Efeito Estufa. Inventário de Emissões. WRF-CHEM. Santa Catarina. Transporte Rodoviário. Transporte Ferroviário.

ABSTRACT

The latest climate changes have intensified over the decades due to the increase in the concentration of Greenhouse Gases (GHG) mainly resulting from human activities. The transport sector is one of those responsible for the increase in concentrations due to the incomplete burning of fossil fuels in the use of different modes, such as road and rail. However, their importance for the flow of Brazilian production, product imports, as well as other human needs and development is evident. Therefore, this study analyzed the impacts of GHG emissions from road and rail modal systems on the port cargo route in the State of Santa Catarina. For this purpose, movement data were used for the ports of Santa Catarina, for road and rail modes, referring to the year 2020 and analyzed using the tool of the Brazilian Greenhouse Gas Protocol - GHG Protocol, in version 2022, as well as the WRF-Chem model. Using the GHG Protocol tool, base data and five other scenarios were analyzed, with different increments that encourage the use of hydrophilic compounds as a strategy for reducing emissions. As a result, lower emissions of equivalent carbon dioxide (CO_{2e}) were observed when using the rail modal, compared to the road, when comparing scenario 5 with the current one, with a 43% reduction in GHG emissions. The food sector was the most representative in all scenarios, with an emission of 217,009.92 tCO_{2e} in the current scenario, followed by the electrical machinery, equipment and material sector with 60,315.08 tCO_{2e}, and machinery and equipment with 58,449.66 tCO_{2e} and wood with 3,264,078.89 tCO_{2e}. Regarding the WRF-Chem, it was possible to observe the emission and dispersion of the CO_2 concentration throughout the State of Santa Catarina, considering the current scenario. With the result of the simulation, it was possible to observe that the coastal region, the middle Itajaí valley and the west have a higher emission predominance. Regarding the concentration of CO_2, it was possible to observe that the night period presented the highest concentrations, due to the Nocturnal Limit Layer (CLN). Such findings make clear the importance of encouraging strategic planning and investments to promote intermodality and optimize logistical efficiency in Santa Catarina, through the diversification of the transport matrix, as a way of promoting sustainability and mitigating climate effects.

Keywords: Greenhouse Gas Emissions. Emissions Inventory. WRF-CHEM. Santa Catarina. Road transport. Rail Transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Setores e sua representatividade na economia catarinense, no ano de 2015. 19
Figura 2 - Ocorrência do Efeito Estufa na superfície terrestre.....25
Figura 3 - Temperatura média global da superfície de 1960 à 2100. 27
Figura 4 - Implicações do aquecimento global para as pessoas, economias e ecossistemas.....27
Figura 5- Diagrama de Sankey de risco climático, respostas de adaptação e resultados de saúde.....28
Figura 6 – As ações nos ecossistemas influenciam a resiliência climática. 29
Figura 7 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020. 30
Figura 8 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2020). 31
Figura 9 - Distribuição espacial dos setores em Santa Catarina. 32
Figura 10 - Localização dos portos catarinenses e suas características para o ano de 2018. 34
Figura 11 - Principais rodovias de Santa Catarina. 35
Figura 12 - Traçado das rodovias existentes, bem como ferrovias que estão em projetos de ampliação. 36
Figura 13 - Evolução para cada cenário proposto. 40
Figura 14 – Imagens de nuvens, obtidas do satélite Goes-16, para o dia 23 de novembro. 47
Figura 15 – Emissão totais (tCO_{2e}) para o modal rodoviário para cada um dos cenários e redução das emissões em relação ao cenário atual. 69
Figura 16 – Emissão totais (tCO_{2e}) para o modal ferroviário para cada um dos cenários e redução das emissões em relação ao cenário atual. 70
Figura 17 – Emissão totais (tCO_{2e}) considerando o somatório total dos modais rodoviário e ferroviário, para cada cenário. 71
Figura 18 - Imagem de Satélite de Intensidade de Luz Noturna (ILN) considerando a área de estudo. 73
Figura 19 - Emissão de CO_2 em Santa Catarina, no dia 23 de novembro de 2020. .75
Figura 20 - Concentração de CO_2 ao longo do Estado de Santa Catarina. 76

Figura 21 - Evolução das emissões anuais de CO_2 fóssil do transporte terrestre de cargas. 82
Figura 22 - Comparação do crescimento da emissão de CO_2, considerando a categoria de veículos. 83
Figura 23 - Percentual de emissão de cada poluente, de acordo com a categoria do veículo: categoria Leves (L), Comerciais Leves (C.L.), Motocicletas (M), Pesados (P). 84
Figura 24 – Emissão de CO_2 (Ton/Ano), por regiões do Estado de Santa Catarina e por cidades. 84
Figura 25 – (A): Quantidade de CNPJ de empresas transportadoras de carga por municípios; (B): Faturamento das empresas transportadora de cargas por municípios. 88
Figura 26 – Corrente de comércio nas mesorregiões de Santa Catarina. 89
Figura 27 – Ciclo da Camada Limite Planetária ao longo do dia. 91
Figura 28 – simulações com diferentes incrementos de temperatura (+1,5ºC; +2,0ºC; +3,0ºC; e +4,0ºC) e suas consequências na biodiversidade. 92
Figura 29 - Emissão de CO_2 em Santa Catarina, no dia 23 de novembro de 2020. .95
Figura 30 - Concentração de CO_2 ao longo do Estado de Santa Catarina. 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dez principais mercadorias conteinerizadas que foram movimentadas nos portos de Santa Catarina em 2020. 20
Tabela 2 - Eficiência energética entre as modalidades de transporte de carga. 21
Tabela 3 – Ficha informativa sobre os principais gases de efeito estufa. 25
Tabela 4 – Setores da economia de Santa Catarina e sua participação nas exportações e importações, bem como seus principais produtos. 32
Tabela 5 – Portos em destaque no Brasil e no mundo e sua cobertura por ferrovias. 37
Tabela 6 - Cenários propostos para este estudo, considerando os modais ferroviários e rodoviários, para Santa Catarina. 39
Tabela 7 - Características consideradas e calculadas para os modais ferroviário e rodoviário 44
Tabela 8 - Exportações em Santa Catarina, por setor produtivo da economia, em 2014. 45
Tabela 9 - Configuração do WRF-Chem. 48
Tabela 10 – Dados do percurso médio mensal, por locomotiva, e número de trens formados, no transporte ferroviário de cargas, nas ferrovias Tereza Cristina (FTC) e Rumo Malha Sul (RMS). 51
Tabela 11 – Valores que consideram a distância entre os segmentos de reta de 1 km. 52
Tabela 12 - Emissão total de cada poluente (t/ano). 52
Tabela 13 – Emissões totais de CO_2 (g/L). 53
Tabela 14 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário atual (87,90%). 56
Tabela 15 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 1 (85%). 56
Tabela 16 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 2 (80%). 57
Tabela 17 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 3 (73%). 57

Tabela 18 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 4 (65%). 58
Tabela 19 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 5 (50%). 58
Tabela 20 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário atual (12,10%). 59
Tabela 21 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 1 (15%). 59
Tabela 22 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 2 (20%). 60
Tabela 23 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 3 (27%). 60
Tabela 24 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 4 (35%). 61
Tabela 25 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 5 (50%). 61
Tabela 26 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário atual. 62
Tabela 27 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 1. 63
Tabela 28 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 2. 64
Tabela 29 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 3. 65
Tabela 30 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 4. 66
Tabela 31 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 5. 67
Tabela 32 – Emissões totais (tCO_{2e}) para os modais rodoviário e ferroviário, considerando os tipos de carga: Conteinerizada, Granel Sólido, Granel líquido e gasoso e Geral. 68
Tabela 33 – Representatividade das Emissões totais (tCO_{2e}) para cada setor produtivo 72

Tabela 34 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Estado de Santa Catarina. 78
Tabela 35 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Brasil. 79
Tabela 36 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Mundo. 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
C2F6	Perfluoretano
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CF4	Perfluorometano
CH_4	Metano
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLP	Camada Limite Planetária
CO_2	Dióxido de carbono
CO_{2e}	Dióxido de carbono equivalente
DAS	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
FTC	Ferrovia Tereza Cristina
GEE	Gases de Efeito Estufa
$GtCO_2$ e	Gigatonelada de Dióxido de carbono equivalente
GHG	Greenhouse Gas
GVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
HFC	Hidroflurocarbonos
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
ILN	Intensidade de luz noturna
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
N_2O	Óxido nitroso
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
OLS	Operational Linescan System
PIB	Produto Interno Bruto

PFC	Perflurocarbonos
RMS	Rumo Malha Sul
SEEG	System Gas Emissions Estimation
SF_6	Hexafluoreto de Enxofre
TEU	Twenty feet Equivalent Unit
TU	Toneladas Uteis
WRF-Chem	Weather Research and Forecasting with Chemistry

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 JUSTIFICATIVA 21
1.2 OBJETIVOS 23
1.2.1 Objetivo geral 23
1.2.2 Objetivos Específicos 23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24
2.1 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E O AQUECIMENTO GLOBAL 24
2.2 MODAIS DE TRANSPORTE E SUA INFLUÊNCIA NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) 29
2.3 ROTA DE CARGAS PORTUÁRIAS EM SANTA CATARINA 31
3 METODOLOGIA 38
3.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE COM MAIS BAIXA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS AOS PORTOS DE SANTA CATARINA 38
3.2 AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS 40
3.2.1 Ferramenta GHG Protocol 40
3.3 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA 45
3.4 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS 46
3.4.1 Simulação utilizando WRF- Chem 46
3.5 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS 53
4 RESULTADOS 55
4.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE COM MAIS BAIXA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS AOS PORTOS

DE SANTA CATARINA E AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS 55
4.2 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA 71
4.3 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS 72
4.3.1 WRF-Chem 72
4.4 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS 76
5 DISCUSSÕES 82
5.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE MENOS POLUENTES AOS PORTOS DE SANTA CATARINA E AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS 82
5.2 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA 86
5.3 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS 88
5.4 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS 91
6 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S) 94
6.1 PRODUTO 1 – INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA 94
6.2 PRODUTO 2- ARTIGO SUBMETIDO 96
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 98
8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 100
REFERÊNCIAS 101

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se intensificado nas últimas décadas em virtude do aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) oriundas, principalmente, de atividades antrópicas. Com isso, ocorre a aceleração do aquecimento global, causando aumento da temperatura global, bem como da frequência de fenômenos naturais. Estudos do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) mostram que entre 2030 e 2052 a temperatura global aumentará em até 1,5ºC, contribuindo para o aumento no nível do mar e das temperaturas regionais e globais, ondas de calor, extinção de espécies da biodiversidade, impactos nos ecossistemas e irregularidade do regime de chuvas, por exemplo (IPCC, 2019; IPCC, 2021; IPCC, 2022; MOHAMMED *et al*., 2021; YANG *et al*., 2014).

Apesar do efeito estufa ser um fenômeno natural responsável por manter a temperatura terrestre regular, o desequilíbrio gerado nas últimas décadas faz com que haja aumento exponencial de gases em camadas específicas da atmosfera. Os gases com maior contribuição para a aceleração do fenômeno de efeito estufa são: Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido Nitroso (N_2O), Perflurocarbonos (PFC), Hidroflurocarbonos (HFC), Metano (CH_4), Hexafluoreto de Enxofre (SF_6) (MATTEI; CUNHA, 2021; OERTEL *et al*., 2016; YANG *et al*., 2014). Destaca-se que alguns setores possuem maior representatividade em relação as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), tais como Energia, Indústrias, Agricultura, Transportes, Construção civil, entre outros (EPA, 2022).

O setor de transportes é um dos grandes contribuintes em virtude da queima incompleta de combustíveis fósseis, sendo que o mesmo foi, em 2016, responsável por 24% das emissões mundiais de dióxido de carbono (WANG; GE, 2019; EPA, 2022). Os impactos socioambientais associados dizem respeito, principalmente, a qualidade do ar em decorrência da emissão de poluentes atmosféricos, que acarretam em diversos danos à saúde humana, independente do modal que seja utilizado (NUNES, 2017; FAN *et al*., 2018). Os gases expelidos para a atmosfera possuem como principal poluente o dióxido de carbono, um dos maiores contribuintes para o aquecimento global, referente a emissões de GEE (CARVALHO, 2011).

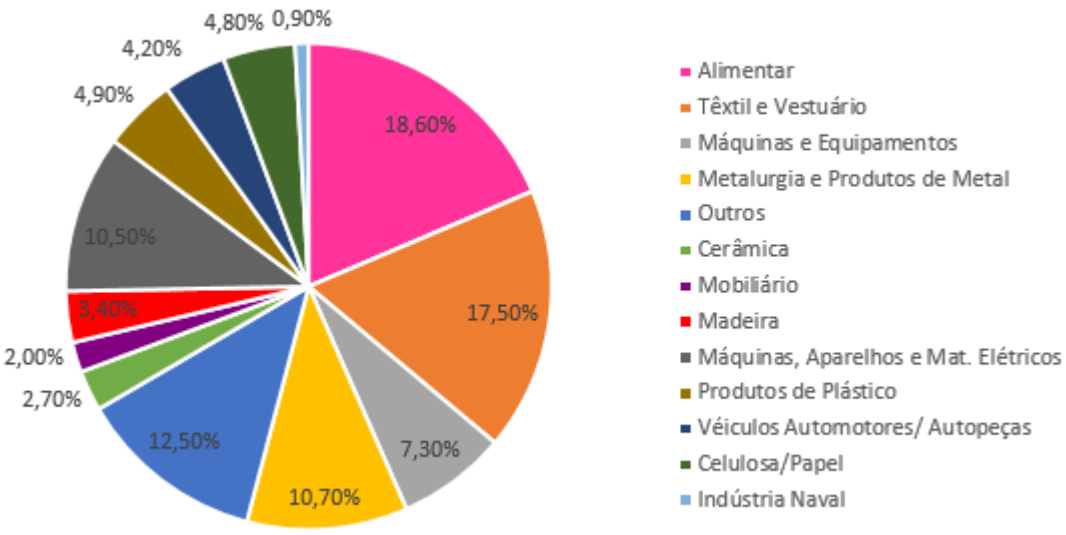
No Brasil, de 7 a 9% do total de emissões de GEE diz respeito ao transporte rodoviário, sendo este o segundo maior contribuinte do ranking nacional em emissões

e o tipo de transporte mais expressivo, com 62%. Há de se destacar também que este é responsável por 90% de todo o diesel consumido no país e que 45% dos caminhões que trafegam no país possuem mais de 30 anos de uso (IPEA, 2011). A importância deste segmento para o escoamento da produção brasileira, importação de produtos, bem como demais necessidades humanas e o desenvolvimento é evidente.

O Sul é a segunda região com mais veículos rodoviários do país, representando 19,6% do total da frota nacional, possuindo a mesma colocação no que diz respeito ao número de caminhões (CNT, 2022). Em Santa Catarina a exportação e importação de produtos possui representação dividida nos modais marítimo (86%), aéreo (2%) e rodoviário (12%) (FIESC, 2017). O modal marítimo é representado pelos portos de Imbituba, Itajaí, São Francisco do Sul, Navegantes e Itapoá, que foram responsáveis, em 2019, pela movimentação de mais de 46 milhões de toneladas de produtos, o que levou aos portos de Itajaí e Itapoá a ocuparem posições expressivas no ranking brasileiro de movimentação de contêineres (FIESC, 2021).

Os portos de Santa Catarina constituem um dos mais importantes complexos portuários da América do Sul, com expressivas e diversificadas movimentações de cargas. Esta diversificação é reflexo de uma economia pulverizada e dispersa entre as várias regiões do Estado. A indústria de alimentos é a que possui maior expressividade, grande parte impulsionada pela produção de suínos e frangos, seguida pelo setor têxtil e do vestuário (Figura 1).

Figura 1 - Setores e sua representatividade na economia catarinense, no ano de 2015.



Fonte: adaptado de FIESC, 2015.

Das exportações nacionais realizadas em 2020 o Estado foi o primeiro em motocompressores para refrigeração, suínos e móveis; e o segundo em frangos, madeiras, produtos cerâmicos, máquinas, aparelhos e materiais elétricos (FIESC, 2022). A Tabela 1 mostra as dez principais mercadorias conteinerizadas que foram movimentadas nos portos de Santa Catarina em 2020.

Tabela 1 - Dez principais mercadorias conteinerizadas que foram movimentadas nos portos de Santa Catarina em 2020.

Produto	Toneladas movimentadas em 2020
Madeira, Carvão Vegetal e Obras de Madeira	3.661.521
Carnes e Miudezas, Comestíveis	2.716.262
Plásticos e Suas Obras	1.717.491
Cereais	903.371
Produtos Químicos Orgânicos	877.568
Máquinas, Aparelhos e Instrumentos Mecânicos, Caldeiras	639.712
Papel e Cartão; Obras de Pasta de Celulose, de Papel ou de Cartão	506.605
Produtos Cerâmicos	497.086
Ferro Fundido, Ferro e Aço	432.384
Máquinas, Aparelhos E Materiais Elétricos, E Suas Partes	402.517

Fonte: FIESC, 2022.

A infraestrutura de transporte é fator primordial para o funcionamento dos portos e, consequentemente, da eficiência de suas operações (MAFALDO, 2020). Todavia, o escoamento da produção até os portos carece de melhorias na infraestrutura já existente, bem como criação de novos cenários, como o aumento da utilização de ferrovias, já que possuem maior capacidade de transporte de cargas o que reduzia custos, tempo e perdas. Anciães *et al.* (1980) *apud* Correa e Ramos (2010) realizaram um estudo comparativo de eficiência energética para cada modal

de transportes, sendo que o modal rodoviário apresentou maior consumo de energia do que o ferroviário (Tabela 2).

Tabela 2 - Eficiência energética entre as modalidades de transporte de carga.

Modalidade	MJ/ton-km
Rodovia	3,53
Ferrovia	1,02
Hidrovia	0,93
Aerovia	40,70
Dutovia	0,74

Fonte: ANCIÃES *et al.* (1980) *apud* CORREA; RAMOS (2010).

De acordo com o supracitado é de primordial importância a realização de estudos que considerem o sistema modal atual, bem como outros modais, como o ferroviário. Assim, é possível realizar um levantamento da influência de cada um na emissão de GEE no transporte de cargas aos portos catarinenses. O presente estudo propõe a análise dos impactos da emissão de gases do efeito estufa (GEE) dos sistemas modais rodoviário e ferroviário na rota de cargas portuárias no Estado de Santa Catarina, incluindo a verificação do impacto dos cenários propostos na temperatura regional e global.

1.1 JUSTIFICATIVA

O IPCC afirma que para frear o aumento de temperatura terrestre algumas mudanças precisam ser realizadas, sendo uma delas na questão de infraestrutura urbana, o que inclui o setor de transportes. Um estudo realizado pela Federação de Indústrias de Santa Catarina, no ano de 2021, demonstra a necessidade de aumento de infraestrutura para os portos do Estado, sendo um dos pontos destacados a necessidade de aumento da malha ferroviária em seu território, bem como na interligação da já existente ao sistema nacional. Os portos de Itajaí e Itapoá, por exemplo, de grande representação e expressividade nacionalmente, não possuem

malha ferroviária de acesso, fazendo com que os produtos cheguem apenas por via rodoviária (FIESC, 2021).

De acordo com esta problemática é de suma importância avaliar e propor diferentes cenários de transportes para o escoamento de cargas até os portos catarinenses, uma vez que, de acordo com Marcilio, Rangel e Peixoto (2017) “a eficiência do setor de transporte funciona como um mecanismo para promover a sustentabilidade ambiental com a redução das emissões de dióxido de carbono” e, a partir deste, será possível verificar os impactos na temperatura regional, nacional e global.

A Política Nacional do Clima (Lei nº 12187 de 2009), juntamente como Decreto 9578 de 2018, propuseram metas e ações de redução de CO_{2e} em diferentes áreas, incluindo o transporte eficiente de baixa emissão de carbono. No entanto, para poder traçar planos para atingir o proposto é necessário conhecer a realidade de cada região. Um exemplo disso é a realização de inventário de gases de efeito estufa, como instrumentos para a gestão ambiental.

De acordo com o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, produzido pelo IEMA (2011): “o inventário pode fornecer subsídios para entender as relações entre as emissões e as concentrações ambientais resultantes e, portanto, quando territorialmente ajustado, auxiliar no estabelecimento de políticas e ações [...]”.

Neste sentido, o presente estudo propõe analisar os impactos da emissão de gases do efeito estufa (GEE) dos sistemas modais rodoviário e ferroviário na rota de cargas portuárias no Estado de Santa Catarina (SC). Este trabalho resultou na elaboração de inventário de emissões atmosféricas de GEE para o atual cenário de transportes rodoviário e ferroviário do Estado de SC. São escassos estudos em Santa Catarina e no Brasil que demonstrem a importância do entendimento da realidade, atual e futuras, em relação a emissão de GEE, bem como qual o impacto destas na temperatura em nível de estado, país e mundo. Também se destaca a contribuição do mesmo como subsídio para a tomada de decisões em relação ao aumento da malha ferroviária, mudanças climáticas e melhorias na qualidade do ar, por exemplo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar os impactos da emissão de gases do efeito estufa (GEE) dos sistemas modais rodoviário e ferroviário na rota de cargas portuárias no Estado de Santa Catarina.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Propor cenários de modais de transporte com mais baixa emissão de poluentes atmosféricos aos portos de Santa Catarina;
- Avaliar a emissão de gases do efeito estufa (GEE) dos cenários por meio de simulação dos modais de demandas futuras;
- Estimar a participação das emissões do transporte de cada setor produtivo para os portos de Santa Catarina;
- Realizar inventário de gases do efeito estufa (GEE), considerando o cenário modal atual do Estado de Santa Catarina, referente às rotas portuárias;
- Estimar a variação climática a partir dos cenários atual e propostos.

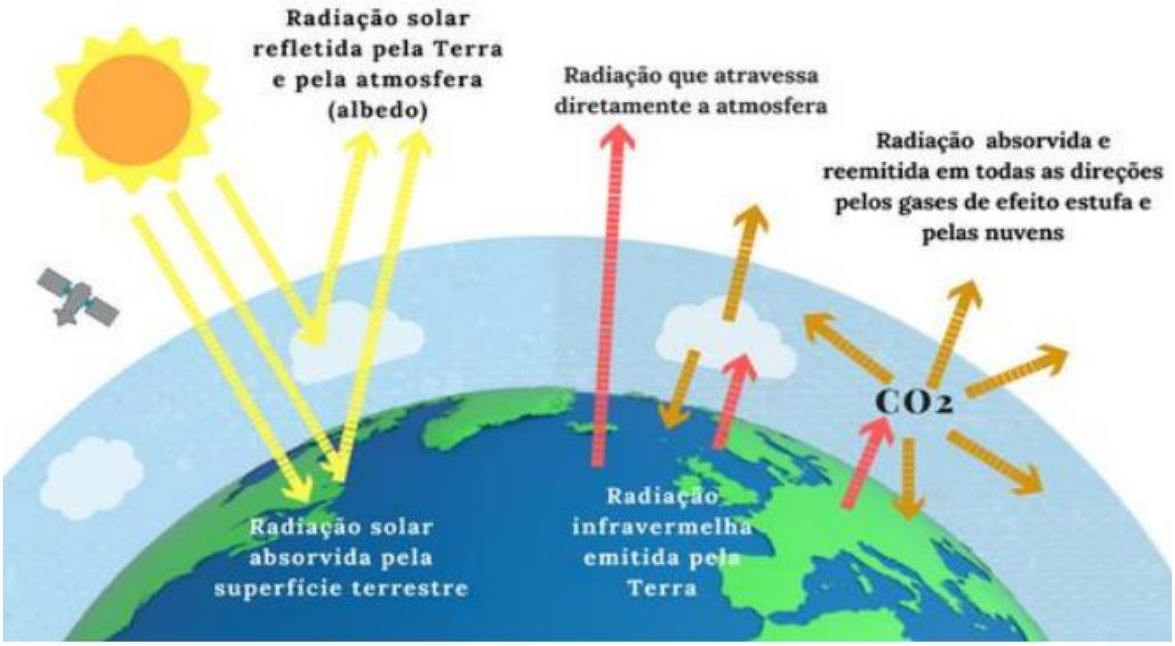
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E O AQUECIMENTO GLOBAL

A superfície terrestre é composta por uma mistura de gases tais como: nitrogênio, oxigênio, argônio, além dos chamados gases de efeito estufa de ocorrência natural na atmosfera (Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido Nitroso (N_2O), Metano (CH_4)). Esta composição química, juntamente com o vapor d'água é responsável por regular a temperatura terrestre, o que mantém as condições de vida no planeta e manutenção da biosfera (JUNGES *et al*., 2018; ABREU, ALBUQUERQUE; FREITAS, 2014). Sem este efeito natural a temperatura média da Terra estaria abaixo do ponto de congelamento da água (LE TREUT *et al*., 2007).

Os chamados gases de efeito estufa possuem característica de absorção de radiação infravermelha (ondas longas) e absorvem pouca radiação visível (ondas curtas), conforme Figura 2. Com isso, a radiação solar possui maior facilidade de chegar à Terra. A superfície terrestre absorve as ondas curtas emitidas pela radiação solar e emite em forma de radiação infravermelha (onda longa), parte desta radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre é absorvida e reemitida pelos gases de efeito estufa e nuvens. Assim, a retenção e reemissão da radiação infravermelha faz com que a atmosfera fique mais quente (JUNGUES *et al*., 2018; INPE, 2022; ÁGUABRASIL, 2015).

Figura 2 - Ocorrência do Efeito Estufa na superfície terrestre.



Fonte: JUNGUES *et al*., 2018.

O potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa são diferentes, sendo que a Universidade de Michigan (2022) disponibiliza uma ficha informativa sobre os principais gases de efeito estufa, com dados sobre a concentração antes da era industrial, em 2020, tempo de permanência na atmosfera, atividades humanas que influenciam e potencial de aquecimento global (Tabela 3).

Tabela 3 – Ficha informativa sobre os principais gases de efeito estufa.

Componente	Concentração pré-industrial (ppmv)	Concentração em 2020 (ppmv)	Tempo de permanência na atmosfera	Principal fonte de atividades humanas	Potencial de aquecimento global
Dióxido de carbono (CO_2)	278	413	Variável	Uso da terra, combustíveis fósseis, produção de cimento	1
Metano (CH_4)	0,722	1889	12	combustíveis fósseis, arrozais, resíduos, gado	28

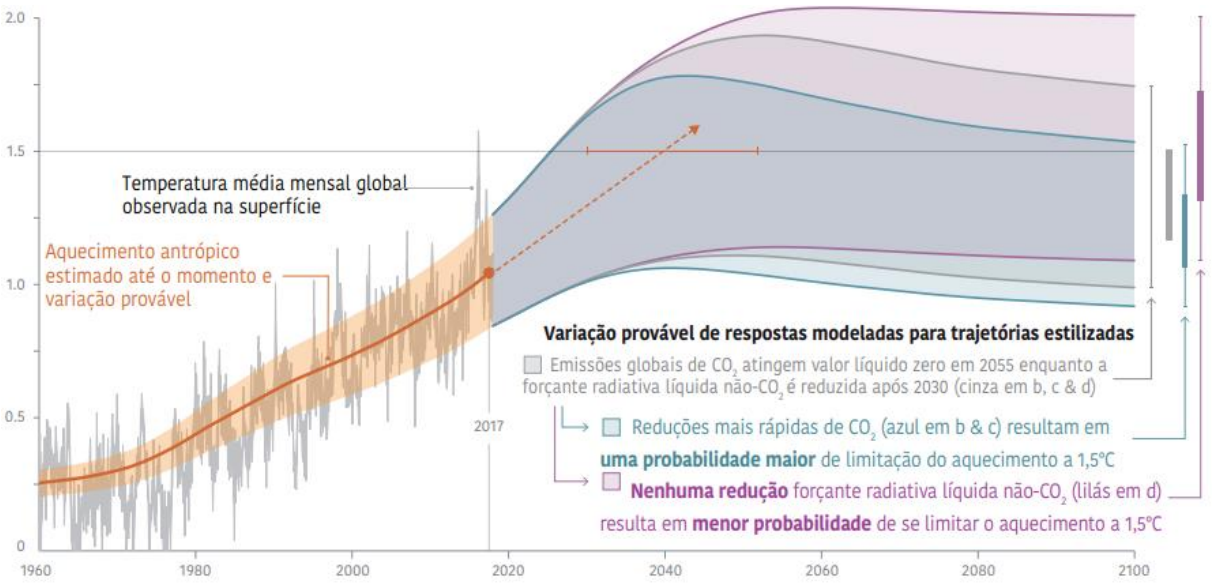
Óxido Nitroso (N_2O)	0,27	0,333	121	Fertilizantes, combustão, processos industriais	265
HFC 23 (CHF_3)	0	0,000024	222	Eletrônicos e refrigerantes	12.400
HFC 134a (CF_3CH_2F)	0	0,000062	13	Refrigerantes	1.300
HFC 152a (CH_3CHF_2)	0	0,0000064	1.5	Processos industriais	138
Perfluorometano (CF_4)	0.00004	0.000079	50.000	Produção de alumínio	6.630
Perfluoretano (C_2F_6)	0	0.0000041	10.000	Produção de alumínio	11.100
Hexafluoreto de Enxofre (SF_6)	0	0.0000073	3.200	Isolante elétrico	23.500

Fonte: UNIVERSITY OF MICHIGAN, 2022

Ao longo dos séculos as atividades humanas vêm intensificando o fenômeno do aquecimento global, em virtude do aumento da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) para a atmosfera. Tal fato se dá, principalmente, pela queima incompleta de combustíveis fósseis e desmatamento de florestas (LE TREUT *et al.*, 2007). Assim, ocorre o chamado aquecimento global, onde de acordo com estudos do IPCC (2018) “estima-se que as atividades humanas tenham causado um aquecimento global de aproximadamente 1,0°C em relação aos níveis pré-industriais”. O mesmo estudo cita que até 2050 este aumento pode chegar a 1,5ºC.

Na Figura 3 tem-se uma simulação realizada pelo IPCC (2018), onde: a linha e o sombreamento laranja referem-se a uma variação climática provável; sombreamento roxo refere-se a estimativa de aumento caso nenhuma ação de redução seja realizada; sombreamento azul refere-se a uma limitação do aquecimento, devido a reduções da emissão de CO_2; e sombreamento cinza refere-se a uma redução de emissões liquidas de CO_2 desde 2020 até 2055.

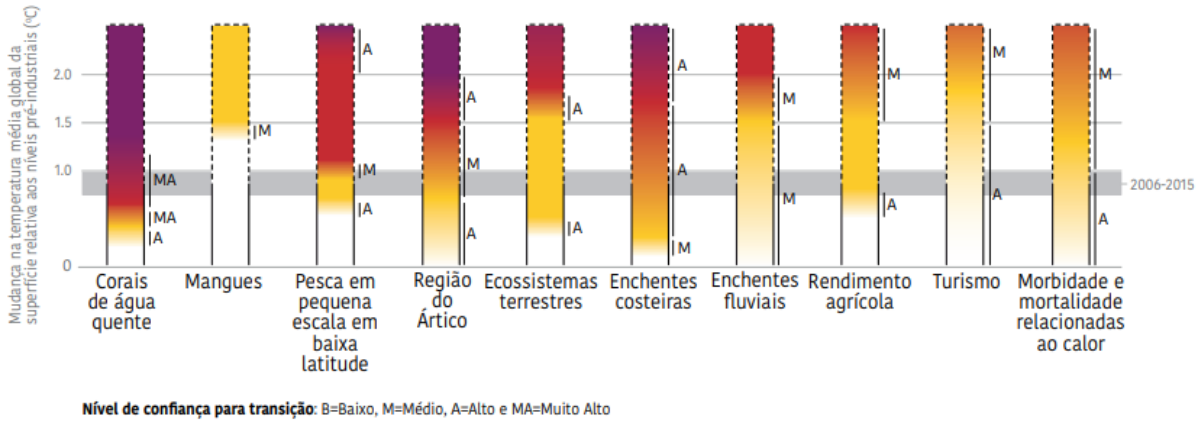
Figura 3 - Temperatura média global da superfície de 1960 à 2100.



Fonte: IPCC, 2018.

Os impactos causados pelas mudanças climáticas, proporcionados em virtude do aquecimento global, pelo aumento dos GEE, aumentando a frequência das secas, inundações, tempestades, incêndios, e temperaturas extremas (IPCC, 2018; IPCC, 2022; NOBRE; REID; VEIGA, 2012). Sendo que, estes fatores possuem implicações para as pessoas, economias e ecossistemas (Figura 4). Pode-se citar, por exemplo a influência direta na produção de alimentos, bem como em aumento de problemas de saúde. Estima-se que até 2050 a redução da disponibilidade de alimentos poderia ocasionar 529 mil mortes/ano (IPCC, 2022).

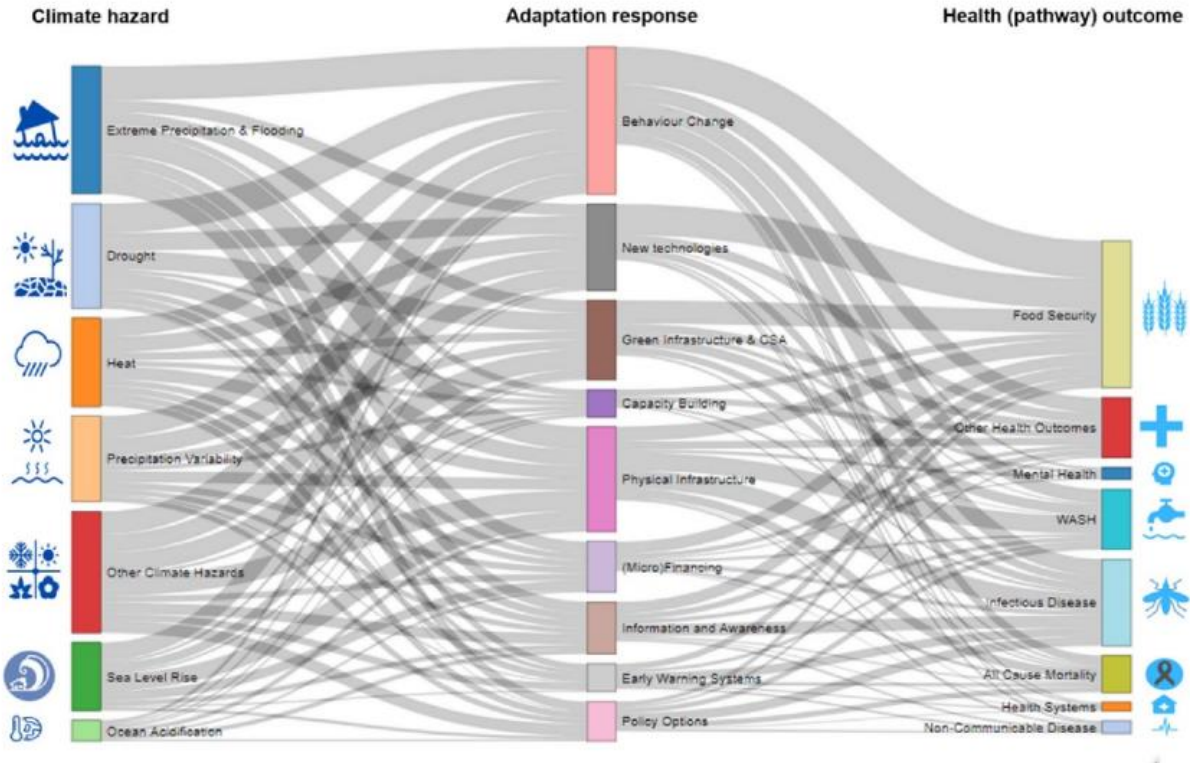
Figura 4 - Implicações do aquecimento global para as pessoas, economias e ecossistemas.



Fonte: IPCC, 2018.

Scheelbeek *et al.* (2021) realizaram um estudo para analisar quais os efeitos na saúde humana em virtude das mudanças climáticas baseando-se em diversos outros artigos sobre o tema. Com isso, foi possível elaborar o diagrama de Sankey de risco climático, respostas de adaptação e resultados de saúde. Na Figura 5 é possível observar que os esforços de adaptação para as mudanças climáticas acarretam em benefícios para vários segmentos associados à saúde.

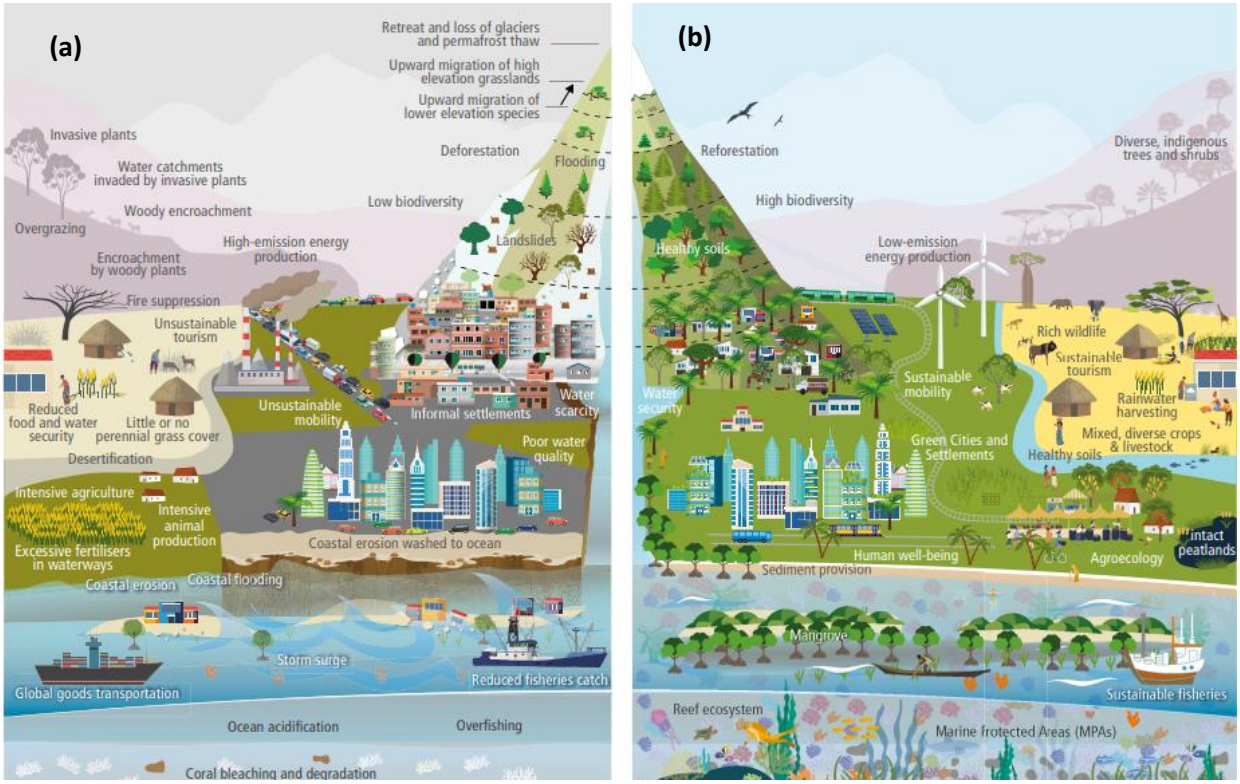
Figura 5- Diagrama de Sankey de risco climático, respostas de adaptação e resultados de saúde.



Fonte: SCHEELBEEK *et al*., 2021.

A manutenção das relações em diferentes ecossistemas, mantendo o equilíbrio entre as atividades humanas e a diversidade é essencial para uma resiliência em relação ao clima. Na Figura 6 é possível observar: (a) como a degradação e exploração desordenada leva ao desenvolvimento insustentável, resultando em más consequências tanto para o bem-estar humano, quanto para a integridade do ecossistema; (b) com ações de desenvolvimento sustentável, a partir do consumo racional dos recursos naturais e atividades humanas pautadas em proteção e restauração dos ecossistemas, ocorre inúmeros benefícios tanto para a melhoria dos serviços ecossistêmicos, quanto para os meios de subsistência (IPCC, 2022).

Figura 6 – As ações nos ecossistemas influenciam a resiliência climática.

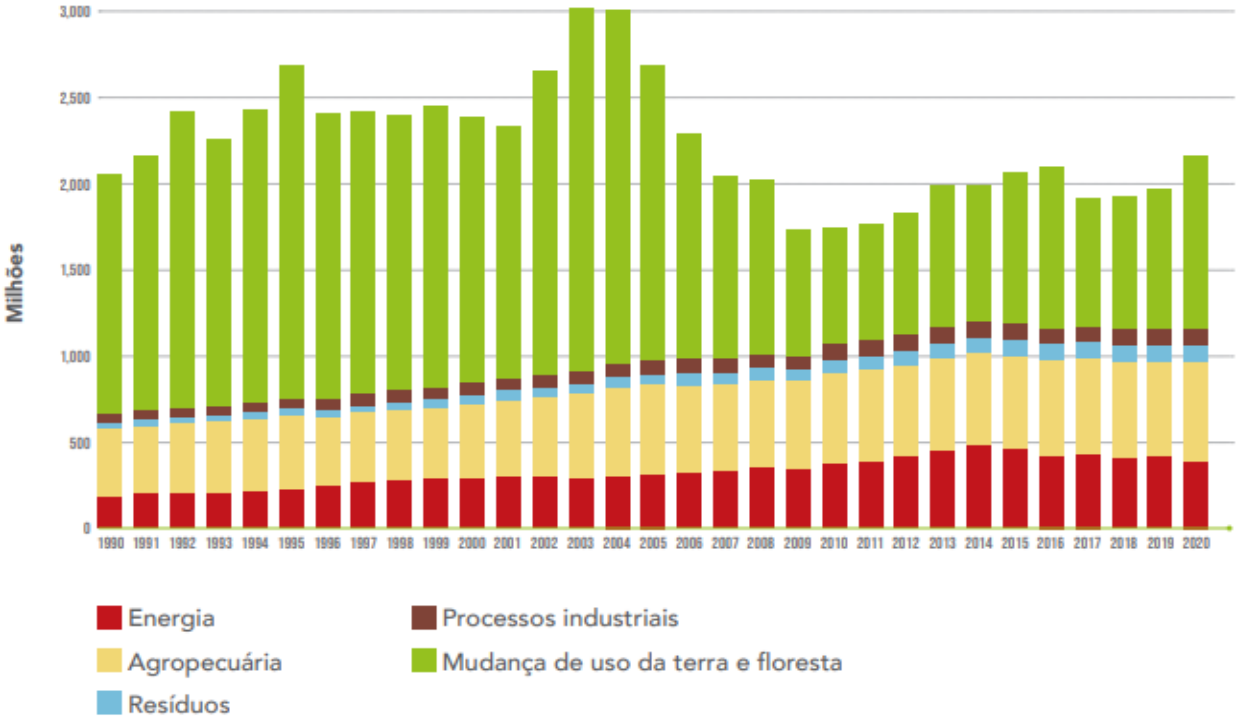


Fonte: IPCC, 2022.

2.2 MODAIS DE TRANSPORTE E SUA INFLUÊNCIA NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

No ano de 2020 o total de emissões de CO_2 equivalente, no Brasil, foi de 2,16 bilhões de toneladas ($GtCO_2$ e), de acordo com o Relatório do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), divulgado no ano de 2021. O mesmo também apresenta o gráfico de emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020 (Figura 7), por setores. O uso da terra é o setor com maior expressividade em emissões, sendo responsáveis em 2020 por 46% do total bruto de emissões.

Figura 7 - Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020.

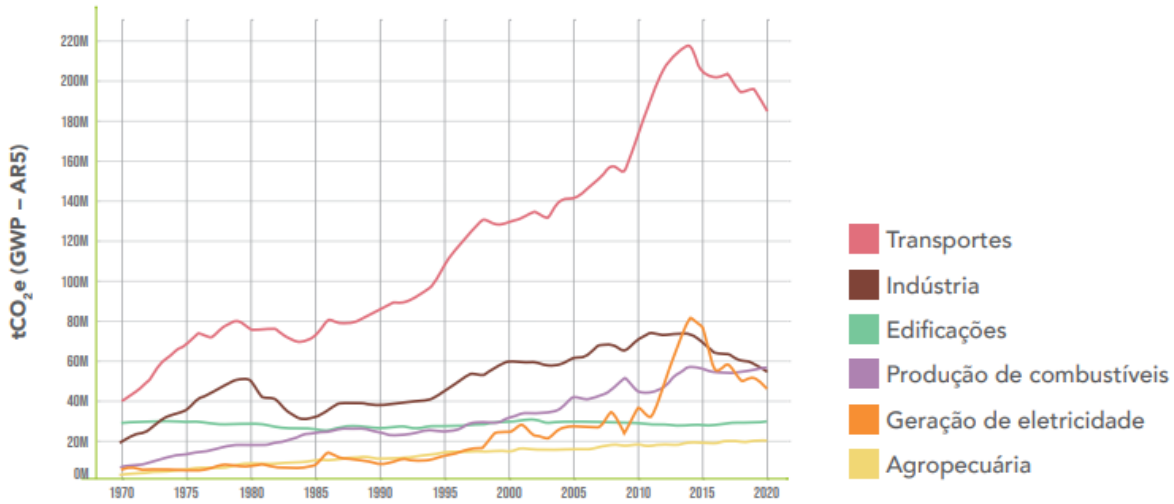


Fonte: SEEG, 2021.

Quando os dados da Figura 7 são destrinchados e analisados por atividade econômica, entende-se que “quase três quartos (73%) das emissões nacionais estão direta ou indiretamente ligadas à produção rural e à especulação com terras” (SEEG, 2021). Em relação ao setor de energia as atividades que fazem parte do total emitido em 2020 (393,7 milhões de toneladas de CO_{2e} emitidas) (SEEG, 2021), são: transporte, indústrias, edificações, produção de combustíveis, geração de eletricidade e agropecuária.

A a atividade de transporte é a que possui maior contribuições de emissão deste setor, em virtude da queima incompleta de combustíveis fósseis (Figura 8). Em 2020 a emissão foi de 185,4 milhões de toneladas de CO_{2e} (SEEG, 2021). Este setor é considerado um dos maiores contribuintes para o desenvolvimento da economia mundial, em virtude da movimentação de pessoas, bens e serviços. A participação na economia pode equivaler a 3 a 5% do Produto Interno Bruto (PIB) de um país (MATTOS, 2001).

Figura 8 - Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia (1970 – 2020).

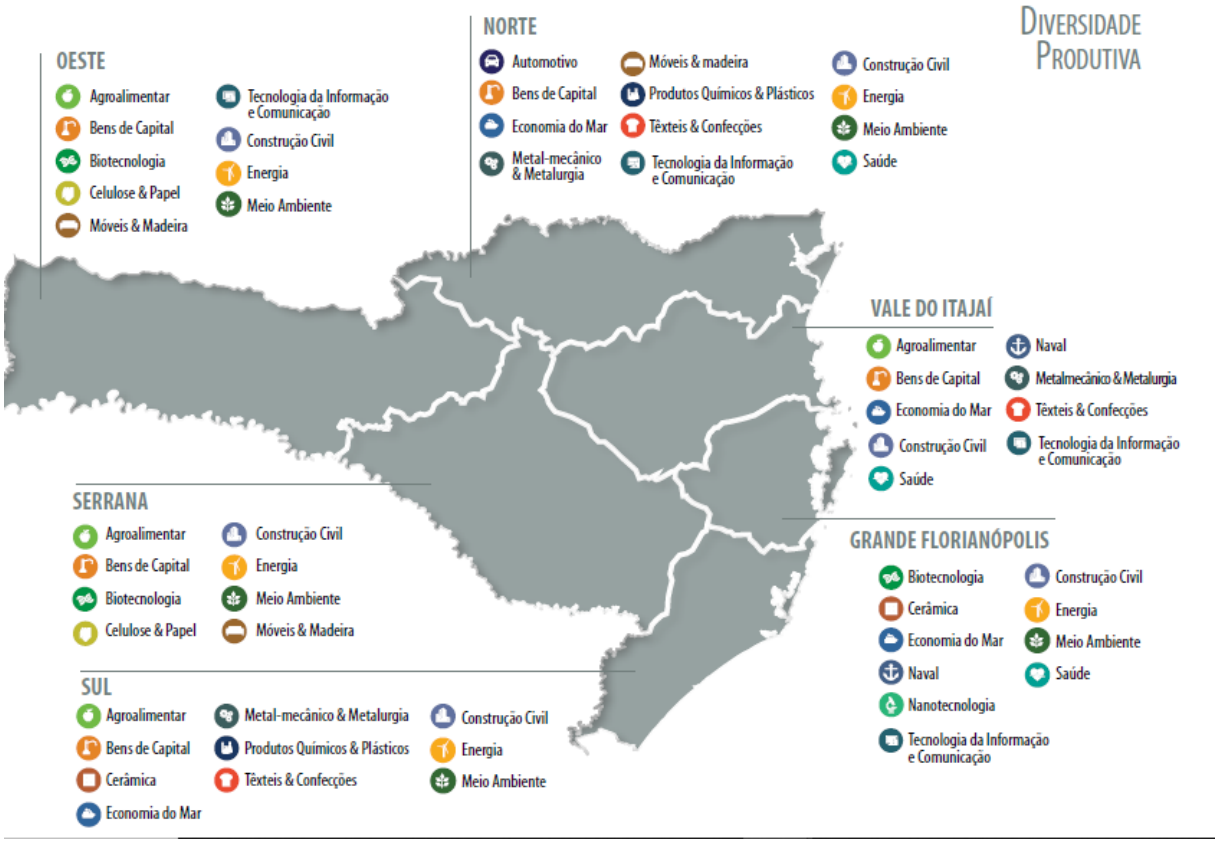


Fonte: SEEG, 2021.

2.3 ROTA DE CARGAS PORTUÁRIAS EM SANTA CATARINA

A indústria catarinense é caracterizada pela sua diversidade, sendo destaque nacional na produção de suínos, pescados, madeira, frangos, têxtil e vestuário, naval, móveis de madeira, plástico, construção civil, alimentas, bebidas, químicos, máquinas e equipamentos, cerâmica, couro e celulose (Figura 9). Esta característica juntamente com a dispersão geográfica das indústrias pelo Estado tem garantido a resiliência frente a momentos de crise, reduzindo os impactos econômicos gerados (FIESC, 2017).

Figura 9 - Distribuição espacial dos setores em Santa Catarina.



Fonte: FIESC, 2017.

O PIB é um índice que representa os bens e serviços produzidos na economia. Em Santa Catarina, no ano de 2019, o PIB atingiu R$323,26 bilhões, garantindo a sexta colocação no ranking dos estados do país. O Norte Catarinense e o Vale do Itajaí são responsáveis por 50% do PIB do estado de SC, em virtude de ter maior representatividade da indústria e em função da localização das atividades portuárias (FIESC, 2022).

Os setores, bem como seus dados de exportação, importação e principais produtos, no ano de 2019 podem ser visualizados na tabela abaixo:

Tabela 4 – Setores da economia de Santa Catarina e sua participação nas exportações e importações, bem como seus principais produtos.

Setor	US$ Exportação	US$ Importação	Principais produtos
Alimentos e Bebidas	US$ 3,6 bilhões 39,3% da	US$ 1,9 bilhão 7,9% da	Carnes de aves e suínos

	indústria de SC	indústria de SC	
Têxtil, Confecção, Couro e Calçados	US$ 299,5 milhões 3,2% da indústria de SC	US$ 1,7 bilhão 7,0% da indústria de SC	Preparos de couro e os tecidos de malha.
Metalurgia e Produtos de Metal	US$ 411,1 milhões 4,4% da indústria de SC	US$ 4,8 bilhões 19,7% da indústria de SC	Sucata de ferro, os revestimentos de ferros laminados planos e os tubos ocos de ferro.
Produtos químicos e de plásticos	US$ 455,6 milhões 4,9% da indústria de SC	US$ 6,6 bilhões 27,1% da indústria de SC	Gelatina, os pigmentose as tampas de plástico.
Equipamentos Elétricos	US$ 819,3 milhões 8,8% da indústria de SC	US$ 2,0 bilhões 8,3% da indústria de SC	Motores elétricos.
Máquinas e Equipamentos	US$ 619,0 milhões 6,7% da indústria de SC	US$ 2,1 bilhões 8,5% da indústria de SC	Compressores.
Madeira e Móveis	US$ 1,8 bilhão 19,3% da indústria de SC	US$ 109,7 milhões 0,5% da indústria de SC	Madeira compensada, as obras de carpintaria para construção, os móveis e madeira serrada
Automotivo	US$ 674,6 milhões 7,3% da indústria de SC	US$ 1,3 bilhão 5,4% da indústria de SC	Partes de motor
Papel e Celulose	US$ 287,6 milhões 3,1% da indústria de SC	US$ 157,3 milhões 0,6% da indústria de SC	Papel Kraft
Cerâmica	US$ 200,3 milhões 2,2% da indústria de SC	US$ 243,6 milhões 1,0% da indústria de SC	Cerâmica não vitrificada
Extrativo	US$ 7,1 milhões 0,1% da indústria de SC	US$ 305,2 milhões 1,3% da indústria de SC	Carbonato de magnésio

Tecnologia da Informação e Comunicação	US$ 31,9 milhões 0,3% da indústria de SC	US$ 1,5 bilhão 6,1% da indústria de SC	Aparelhos de controle
Óleo Gás e Eletricidade	US$ 3,5 milhões 0, 05% da indústria de SC	US$ 162,3 milhões 0,7% da indústria de SC	Energia

Fonte: adaptado de FIESC, 2022.

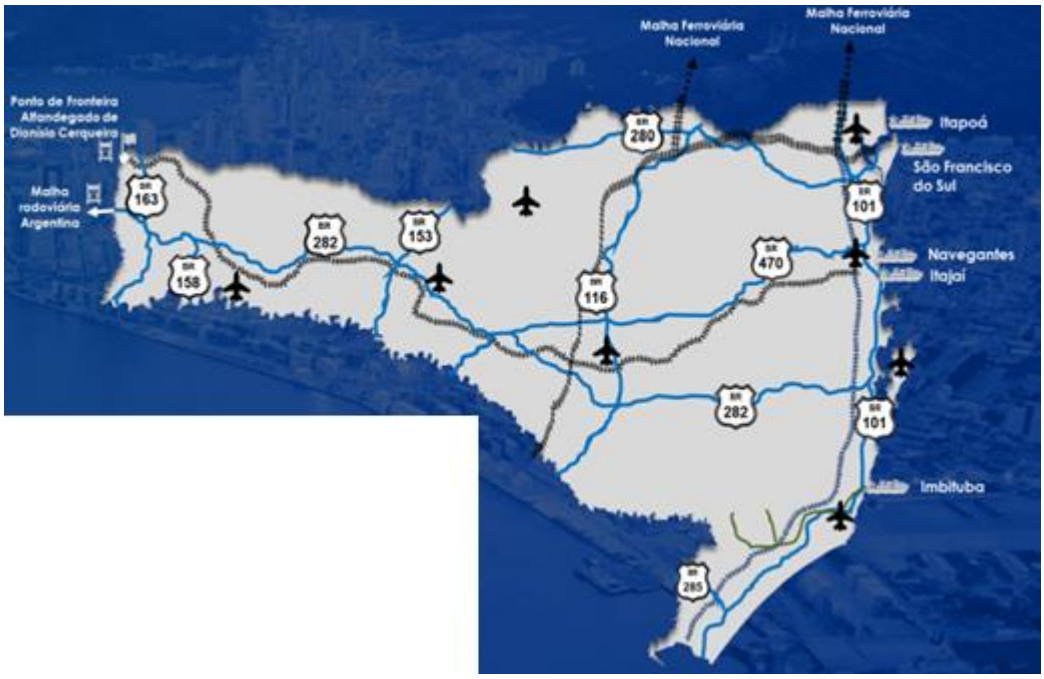
A importação e exportação, nos portos catarinenses, se dão nos portos de Itapoá, São Francisco do Sul, Itajaí, Navegantes e Imbituba, sendo considerados um dos mais importantes complexos portuários da América do Sul. Em 2020, foram responsáveis pela movimentação de 2.148.655 TEUs, o que equivale a 20,2% da movimentação brasileira, um crescimento de 2% se comparado com os dados de 2018 (Figura 10). Estes resultados positivos possuem relação com a vocação catarinense para a atividade portuária, que se dá principalmente pela posição geográfica estratégica, condições naturais com estuários abrigados e movimentação de carga de valor agregado (FIESC, 2022).

Figura 10 - Localização dos portos catarinenses e suas características para o ano de 2018.

Fonte: FIESC, 2019

O escoamento dos bens e serviços se dá prioritariamente a partir do uso de rodovias, uma vez que 68,7% da matriz de transporte do Estado é composta pelo modal rodoviário, seguido de 18,6% aquaviário, 9,7% ferroviário, 2,9% dutoviário e 0,1% aeroviário. De acordo com a FIESC (2019), o Estado possui uma malha rodoviária de 2.606 quilômetros de rodovias federais e 8.345 quilômetros de rodovias estaduais. A Figura 11 apresenta as principais rodovias.

Figura 11 - Principais rodovias de Santa Catarina.



Fonte: FIESC, 2022

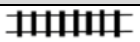
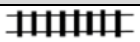
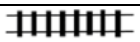
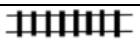
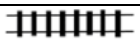
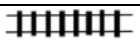
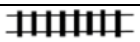
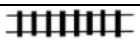
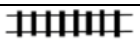
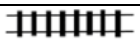
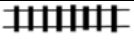
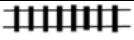
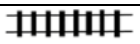
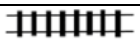
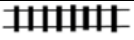
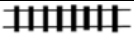
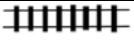
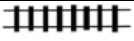
Em relação as ferrovias, atualmente têm-se 764 km em operação que conecta ao Porto de São Francisco do Sul, além da Ferrovia Teresa Cristina com 164 quilômetros de extensão. Há dois projetos para ampliação deste modal denominados de corredor Leste Oeste e a Ferrovia Litorânea. O projeto da Ferrovia Litorânea segue parado devido a impasses com a Funai, em um trecho que passaria por Terras Indígenas na altura de Palhoça, na localidade do Morro dos Cavalos. Já a Ferrovia Leste-Oeste, de acordo com UNESC (2017), sofreu com adiamentos, impugnações, suspensões e revogação, porém neste momento passa por estudo de análise de melhor traçado.

As ferrovias existentes e projetadas podem ser verificadas na Figura 12. Apesar da importância dos complexos portuários catarinenses no cenário nacional, apenas o porto de São Francisco do Sul possui ligação ferroviária. Sendo que, de acordo com a FIESC (2022) os principais portos do Brasil e do Mundo possuem ligação com malhas ferroviárias (Tabela 5), o que acende um alerta ao Estado para que os projetos de ampliação saiam efetivamente do papel.

Figura 12 - Traçado das rodovias existentes, bem como ferrovias que estão em projetos de ampliação.

Fonte: FIESC, 2019.

Tabela 5 – Portos em destaque no Brasil e no mundo e sua cobertura por ferrovias.

PORTOS BRASILEIROS			PORTOS PELO MUNDO	
Porto	**Ranking TEUs**	**Ferrovia**	**Porto**	**Ferrovia**
Santos	1 º		Hong Kong – China	
Itajaí	2 º	Não possui	Busan – Coréia do Sul	
Paranaguá	3 º		Ningbo – China	
DP Word Santos	4 º		Nova Jersey – EUA	
Itapoá	5 º	Não possui	Los Angeles – EUA	
Rio Grande	6 º		Valência – Espanha	
Chibatão	7 º		Roterdã – Holanda	
Suape	8 º		Hamburgo – Alemanha	
Rio de Janeiro	9 º		Barlecona – Espanha	
Pecém	10 º		Le Havre - França	

Fonte: adaptado de FIESC, 2022.

3 METODOLOGIA

O presente estudo foi norteado por meio das seguintes etapas: Proposição de cenários de modais de transporte com mais baixa emissão de poluentes atmosféricos aos portos de Santa Catarina; Avaliação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) dos cenários por meio de simulação dos modais de demandas futuras; Estimativa da participação das emissões do transporte de cada setor produtivo para os portos de Santa Catarina; Realização de inventário de gases do efeito estufa (GEE), considerando o cenário modal atual do Estado de Santa Catarina, referente às rotas portuárias; e Estimativa da variação climática a partir dos cenários atual e propostos.

3.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE COM MAIS BAIXA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS AOS PORTOS DE SANTA CATARINA

A proposição de cenários se deu com base no diagnóstico atual para o sistema modal catarinense referente às rotas portuárias, a fim de realizar uma análise dos impactos dos cenários na emissão de GEE. Foram considerados apenas cenários com envolvimento dos modais rodoviário e ferroviário. Como embasamento para uma proposição o mais realista possível, com cenários que efetivamente podem ser alcançados, considerou-se os dados do Anuário do Setor Ferroviário, bem com o estudo Santa Catarina em Dados 2017 (FIESC, 2017).

O Anuário do Setor Ferroviário, disponibilizado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, possui dados referentes à prestação dos serviços públicos de transporte ferroviário de cargas. Utilizou-se os dados de transporte de cargas Origem-Destino, para o ano de 2020, considerando as cargas com origem em diversos Estados, mas com Destino em Santa Catarina, o que resultou em 6.282.599 TU. Comparando este com o total de cargas movimentadas nos portos de Santa Catarina (51.810.776 TU), em 2020, tem-se que o modal ferroviário foi responsável por 12,1%.

Para a elaboração dos cenários (Tabela 6) foram considerados diferentes incrementos levando em conta a premissa de que, com a ampliação do modal ferroviário, haverá maior utilização do mesmo e redução na utilização do rodoviário. Ainda, como este estudo objetiva analisar as rotas de cargas que são destinadas aos portos considerou-se que mesmo que existam outros modais de transporte, como cabotagem e aeroviário, por exemplo, em algum momento serão utilizadas rodovias para a realização do transporte.

Atualmente o Estado possui 1365 km de estradas de Ferro e os projetos futuros, descritos no estudo “Santa Catarina em Dados 2017”, somariam mais 852 km de ferrovias para o estado, o que totalizaria 2217 km, ou seja, 7,7% de crescimento (FIESC, 2017, p. 41). Diante disso, foi considerado que, quando houver a finalização da implantação dos projetos de ampliação, o transporte ferroviário será responsável por 50% do transporte de cargas portuárias.

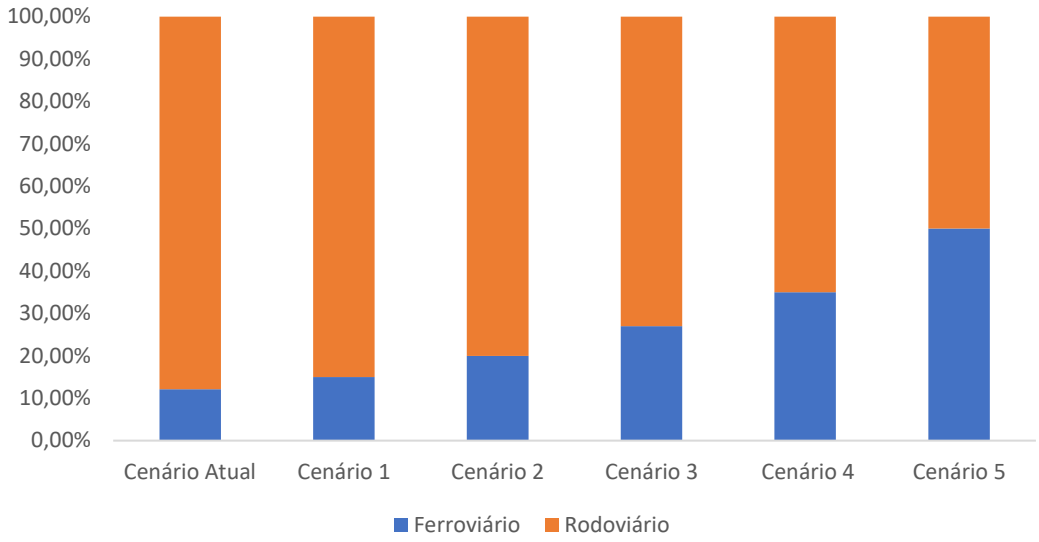
Os incrementos foram estimados para redução gradativa do transporte rodoviário ao longo de cada cenário proposto, de modo que no cenário 5 ambos os modais seriam responsáveis por 50% de representatividade (Tabela 6).

Tabela 6 - Cenários propostos para este estudo, considerando os modais ferroviários e rodoviários, para Santa Catarina.

Modal / Cenário	Atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Ferroviário	12,10%	15,00%	20,00%	27,00%	35,00%	50,00%
Rodoviário	87,90%	85,00%	80,00%	73,00%	65,00%	50,00%
Incremento ferroviário	--	23,97%	65,29%	123,14%	189,26%	313,22%

Na Figura 13 é possível visualizar de forma mais clara a alteração gradativa para cada cenário.

Figura 13 - Evolução para cada cenário proposto.



De modo a avaliar o impacto de cada cenário nas emissões de Gases de Efeito Estufa foi utilizada a ferramenta do GHG Protocol, para viabilizar a comparação. Para isso, realizou-se o inventário de GEE e no final os resultados foram comparados.

3.2 AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS

3.2.1 Ferramenta GHG Protocol

A realização do Inventário de Gases de Efeito Estufa (GEE) se deu por meio da utilização da ferramenta do Protocolo Brasileiro de Gases de Efeito Estufa - GHG Protocol, na versão 2022. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development (WBSCD), compatível com a norma ISO 14.064, bem como com as metodologias de cálculo do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Para o Brasil esta ferramenta foi adaptada à realidade nacional pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (GVces), Ministério do Meio Ambiente

(MMA) e o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) (FGV, 2009).

A metodologia do GHG Protocol estabelece algumas etapas para a elaboração do inventário, sendo considerados os Escopos 1, 2 e 3. No presente estudo será considerado apenas o Escopo 1 (emissões diretas), com foco na ferramenta de cálculo referente a queima de combustíveis fósseis móveis. A temporalidade dos dados levará em conta o ano de 2020, apenas para os modais ferroviários e rodoviários com cargas movimentadas nos portos de Santa Catarina.

Os dados de quantidade, perfil e setor produtivo transportado nos portos foram coletados da base de dados da ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) disponíveis no Estatístico Aquaviário 2.1.4. Estas informações orientaram os cálculos de quantidade de caminhões e locomotivas necessários e consumo de combustível no ano (rodoviário e ferroviário), sendo estes itens essenciais para serem inseridos na ferramenta GHG Protocol para a análise de emissões de GEE. Além disso, foi possível verificar qual a participação de cada setor produtivo da economia catarinense na emissão de GEE.

As equações utilizadas para realizar as conversões necessárias foram:

- **Quantidade de caminhões necessários para o modal Rodoviário:**

$$\mathrm{Qc} = \frac{\mathrm{Qct2020}}{\mathrm{Ccarga}} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

Qc= Quantidade da caminhões

Qct2020 = Quantidade de carga transportada em 2020 (ton) pelo modal rodoviário

Ccarga = Capacidade de carga de cada caminhão (ton)

- **Consumo de combustível para o modal Rodoviário:**

$$\mathrm{Cc} = \frac{\mathrm{Dp}}{\mathrm{Em}} \mathrm{x}\ \mathrm{Qc} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

Cc = Consumo de combustível (l)

Dp = Distância percorrida (km)

Em = Eficiência do motor (km/l)

Qc = Quantidade de caminhões

- **Eficiência da locomotiva:**

Para o cálculo da eficiência da locomotiva, em km/l, utilizou-se os dados contidos na tabela 4.

$$EL = \left(\frac{Vc}{Cc}\right) \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

EL = Eficiência da Locomotiva (km/l)

Vc = Velocidade considerada para o modal ferroviário (km/h)

Cc = Consumo de combustível na marcha 4 (l/h)

- **Número de vagões**

$$\mathrm{NV} = \left(\frac{\mathrm{Qctt2020}}{\mathrm{Ccargatv}}\right) \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

NV = Número de vagões

Qct2020 = Quantidade de carga transportada em 2020 (ton) pelo modal rodoviário

Ccargatv = Capacidade de carga de cada vagão (ton)

- **Quantidade viagens com locomotivas**

$$\mathrm{QVL} = \frac{\left(\frac{\mathrm{Qctt2020}}{\mathrm{Ccargatv}}\right)}{52{,}5\ vagões} \qquad \text{Equação 5}$$

Onde:

QVL = Quantidade de viagens com locomotivas

Qct2020 = Quantidade de carga transportada em 2020 (ton) pelo modal rodoviário

Ccargatv = Capacidade de carga de cada vagão (ton)

52,5 vagões = Como a composição possui duas locomotivas com 105 vagões considerou-se que cada locomotiva possui, em média, 52,5 vagões.

- **Consumo de combustível para o modal Ferroviário**

$$CcL = \left(\frac{Dp}{EL}\right) \times QVL \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

CcL: Consumo de combustível pelas locomotivas (l)

EL = Eficiência da Locomotiva (km/l)

Dp = Distância percorrida (km)

QVL = Quantidade de viagens com locomotivas

As características consideradas e calculadas, por meio das equações 1 a 6, para os modais ferroviário e rodoviário são apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Características consideradas e calculadas para os modais ferroviário e rodoviário.

Características	Ferroviário	Rodoviário			
		Carga Conteinerizada	Granel Sólido	Granel Líquido e Gasoso	Carga Geral
Modelo	ES43BBi	Iveco Stralis NR 410	Volvo	Scania	Mercedes
Tipo de motor	GEVO V12	NR 410	D12 Litros	R 540	MB OM 926 LA
Consumo em Marcha 4	Notch 4 312,7 l/h (SANCHES, 2022)	-	-	-	-
Consumo de combustível	0,08 km/l (Equação 3)	6,0 km/l (CABRAL, 2010)	2,2 km/l (CASSANE, 2020)	3,9 km/ l (CANAL DANA, 2020)	3,5 km/l (MERCEDES BENZ, 2019)
Tipo de combustível	Diesel (13 % de biodiesel) (BRASIL, 2021)				
Capacidade de transporte de carga considerada	76 toneladas por vagão	28,5 ton (GUIA MARÍTIMO, 2022)	34 ton	32 ton	18,5 ton
Velocidade considerada	25 km/h (SCPAR, 2021)	80 km/h (NSC, 2022)			
Características	105 vagões com 02 locomotivas (LOGWEB, 2018)	--	--	--	--
Distância média percorrida	623 km (Extensão da ferrovia Leste – Oeste) (FIESC, 2017)				

3.3 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA

Com os dados provenientes do Inventário de Gases de Efeito Estufa (GEE), utilizando a ferramenta GHG Protocol, do cenário atual e proposto foi possível realizar a estimativa de participação destas emissões para cada setor produtivo. Para isso, foram utilizados os dados de exportação, por setor produtivo da economia catarinense (Tabela 8), contidos no documento Santa Catarina em Dados (FIESC, 2015). Assim, foi considerado que estes dados tratam de exportações realizadas em portos catarinenses.

Tabela 8 - Exportações em Santa Catarina, por setor produtivo da economia, em 2014.

Setor	Exportação em 2014
Alimentar	34,9%
Têxtil e Vestuário	1,9%
Máquinas e Equipamentos	9,4%
Metalurgia e Produtos de Metal	2,9%
Outros	22,4%
Cerâmica	1,4%
Mobiliário	2,3%
Madeira	6,3%
Máquinas, Aparelhos e Mat. Elétricos	9,7%
Produtos de Plástico	0,7%
Veículos Automotores/ Autopeças	5,5%
Celulose/Papel	2,6%

Fonte: adaptado de FIESC, 2015.

3.4 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS

3.4.1 Simulação utilizando WRF- Chem

O modelo Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem) é um modelo desenvolvido pelo NOAA, em parceria com outras instituições científicas, com diferentes módulos que podem ser acoplados (SKAMAROCK *et al*., 2008). Sendo eles: previsão do tempo (REAL), químico (CHEM), idealizado de alta resolução (LES), queimadas (FIRE) entre outros (IRIART; FISCH, 2016). O WRF-Chem tem sido utilizado para diversos estudos sobre a qualidade do ar.

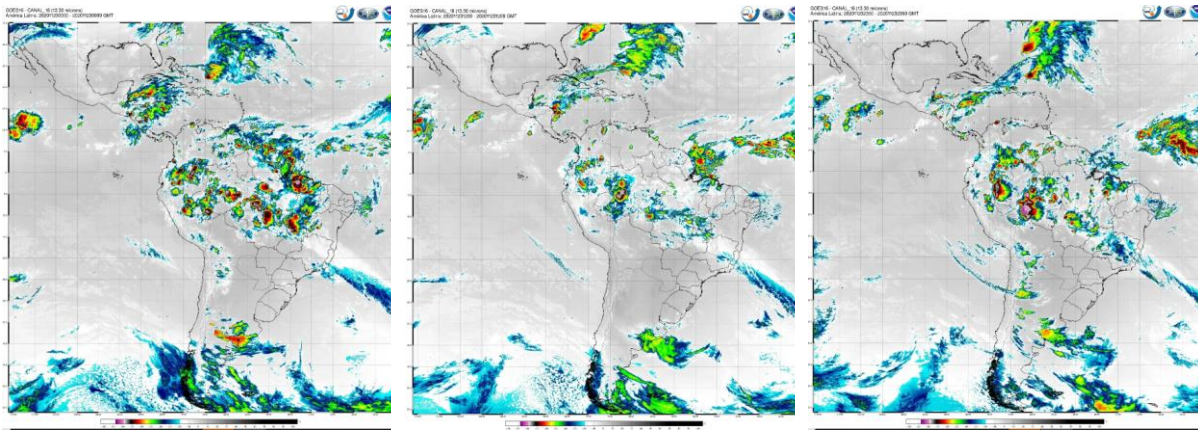
A simulação de gases utilizando o modelo Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem) nesta pesquisa tomou como base o estudo de Rafee *et al.* (2015) denominado de “Estudo numérico do impacto das emissões veiculares e fixas da cidade de Manaus nas concentrações de poluentes atmosféricos da região amazônica”. Entretanto, o foco deste trabalho são as concentrações de CO_2 relacionadas ao transporte de carga por caminhões e por ferrovias.

3.4.1.1 Definição dos dados a serem inseridos no WRF-Chem

O domínio da área de estudo compreende os limites do Estado de Santa Catarina, com área total de 95.346 km², sendo este localizado no Sul do Brasil. Para definição do período de estudo foram utilizados dados de precipitação do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). Foram selecionados todos os dados de precipitação das estações automáticas de Santa Catarina, para o mês de novembro de 2020. Analisando os dados, foi possível observar que o período de 22 a 28 de novembro de 2020 foi o que apresentou menores índices de chuva. Assim, o dia escolhido para realização da simulação com o modelo WRF-CHEM foi 23 de novembro de 2020, de 0 UTC a 23 UTC.

As imagens da Figura 14 foram obtidas do Banco de Dados de Imagens da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA), do INPE. As mesmas referem-se ao Satélte Goes 16 (*Geostationay Operational Enviromnmental*), Canal 16, 13,30 microns que comprova a ausência de nuvem entre 00 e 23:50 horas, no dia 23 de novembro de 2020, escolhido para simulação com o modelo WRF-CHEM, em um intervalo de 12 horas.

Figura 14 – Imagens de nuvens, obtidas do satélite Goes-16, para o dia 23 de novembro.



00 horas **12 horas** **23:50 horas**

Para a realização das simulações, o modelo WRF-Chem foi configurado em um domínio com 160 pontos em x e 110 em y, com um espaçamento horizontal de 5 km, centradas no Estado de Santa Catarina, nas coordenadas -27,65 S e -51,1 O. Foram utilizados na configuração do modelo 31 níveis na vertical, com topo em 50 hPa, correspondendo a aproximadamente 20 km de altura. As configurações utilizadas no WRF-Chem podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Configuração do WRF-Chem.

Atributos	Configuração
Domínio	Resolução de 5 km
Período de simulação	23 de novembro de 2020
Opções físicas	
Camada limite	Yonsei University scheme (HONG; NOH; DUDHIA, 2006)
Superfície	Unified Noah land-surface model (TEWARI *et al.*, 2007)
Microfísica de nuvens	Morrison 2-momentos (MORRISON; THOMPSON; TATARSKII, 2009)
Camada de superfície	Revised Mesoscale Model versão 5 Monin–Obukhov scheme (JIMÉNEZ *et al.*, 2012)
Radiação	Onda curta e onda longa: esquema RRTMG (IACONO *et al.*, 2008)
Opções de química	
Química de fase gasosa	Updated RACM version with chemical reactions for sesquiterpenes (PAPIEZ *et al.,* 2009)
Aerossol module	MADE/VBS (AHMADOV *et al.*, 2012)
Ativação do aerossol	Abdul-Razzak and Ghan scheme (ABDUL-RAZZAK e GHAN, 2000)
Fotólise	TUV (MADRONICH, 1987)
Emissões	
Biogênicas	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature - MEGAN (GUENTHER *et al.,* 2006)
Antropogênicas	Regional
Condição meteorológica inicial e de contorno	ERA5
Condição química inicial	Defout

Neste estudo o modelo WRF-Chem foi utilizado para avaliar a dispersão apenas do GEE dióxido de carbono (CO_2), ao longo do Estado de Santa Catarina. Para atingir esse objetivo houve a adaptação de um inventário de emissões antropogênicas para conter as emissões de CO_2 relacionadas ao transporte de carga por caminhões e ferrovias. Para isso, foi necessário realizar o cálculo dos dados de entrada, tais como: fatores de emissão e emissões do modal rodoviário e ferroviário, que serão descritos nos tópicos abaixo.

3.4.1.1.1 Emissão de caminhões pelo uso do modal rodoviário utilizada no modelo WRF-Chem

Para as emissões rodoviárias como dado de entrada no modelo WRF-Chem foi utilizado a base de dados do Detran de Santa Catarina (DETRAN, 2023), de modo a considerar o cálculo da fração de caminhões no Estado (Equação 7). Para tanto, foi utilizado o número total de caminhões, bem como o número total de veículos do Estado, resultando em uma fração de caminhões de 0,0848 em relação ao número total de veículos no estado.

$$\text{Fração de caminhões} = \frac{\text{Quantidade de caminhões}}{\text{Quantidade total de veículos}} \quad \text{Equação 7}$$

A intensidade de uso dos caminhões foi utilizada com base nos dados citados por Rafee *et al*. (2015), para a cidade de Manaus, sendo de 128,35 km/dia. Já, o fator de emissão de entrada no modelo se dá na unidade de kg/km, assim, foi necessário utilizar o fator de emissão de CO_2 caminhões, da ferramenta GHG Protocol, de 2603 kg/L, bem como a média de eficiência dos mesmos, conforme dados da Tabela 7 (4,0 km/L, aproximadamente). Assim, o fator de emissão resultante foi de 650 kg/km. A equação de emissão levou em consideração o número de veículos, fator de emissão e a intensidade de uso de caminhões, sendo:

$$\text{Equação de emissão } \left(\frac{\text{g CO2}}{\text{dia}}\right) = \text{número de veículos } \times \text{fator de emissão } \times \text{intensidade de uso}$$

Equação 9

A intensidade de luz noturna (ILN) foi utilizada para realizar a espacialização do número de veículos em cada ponto da grade no modelo WRF-CHEM. Os dados são capturados pelo sensor OLS (Operational Linescan System), que faz parte do Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) e disponibilizados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). As imagens estão disponíveis para o período de 1992 e 2013, possuem uma resolução espacial de aproximadamente 1 km, sendo que a escala de intensidade é representada por valores de pixels que variam de 0 (sem luz) a 63 (saturado por luzes) (DULAC; GODOY; KOBIYAMA, 2017). De modo a evitar interferências fora dos limites do Estado de Santa Catarina os dados foram recortados utilizando o shape disponível na base cartográfica do IBGE.

3.4.1.1.2 Emissões pelo uso do modal ferroviário utilizada no modelo WRF-CHEM

O desenvolvimento das estimativas de emissões ferroviárias baseou-se no comprimento da ferrovia e estimativas médias para o número de trens, percurso e as taxas de emissões. Foi levantado o traçado das vias já existentes, disponibilizado na base de dados do IBGE. Os dados de número de trens que circulam por dia, bem como a quilometragem percorrida foram calculadas a partir das informações contidas no Anuário do Setor Ferroviário da ANTT (2022), considerando a ferrovia Tereza Cristina e Rumo Malha Sul, conforme Tabela 10. Destaca-se que os dados se deram para o ano de 2020, para a Ferrovia Tereza Cristina (FTC), e para 2019 para a Rumo Malha Sul (RMS), uma vez que para esta não havia dados disponíveis para o ano base deste estudo em 2020.

Com base nos dados da Tabela 10, foi possível obter a média mensal da distância percorrida por trens nas ferrovias do Estado. Considerando um mês de 30 dias e que cada trem é formado por 2 locomotivas foi possível obter o valor do número de trens e percurso por dia. Assim, após a multiplicação destes dados resultou-se na distância total percorrida em cada ferrovia, por dia, conforme equação 9.

$$\text{Distância total percorrida} = \text{Número de trens/dia} \times Percurso\ dos\ trens/dia$$

Equação 9

Tabela 10 – Dados do percurso médio mensal, por locomotiva, e número de trens formados, no transporte ferroviário de cargas, nas ferrovias Tereza Cristina (FTC) e Rumo Malha Sul (RMS).

Percurso Médio Mensal, por Locomotiva, no Transporte Ferroviário de Cargas (km)												
	Jan	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**
FTC	3.619	3.546	3.926	3.740	3.607	3.535	3.504	3.795	3.726	3.385	3.512	3.586
RMS	8867	8673	9423	8441	8118	8351	9091	9296	7976	9009	9063	7807
Número de Trens Formados no Transporte Ferroviário de Cargas, por Mês												
	Jan	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**
FTC	988	983	1.030	1.075	1.095	1.125	1.126	1.072	1.113	964	1.037	1.038
RMS	2.356	2.586	2.856	2.552	2.488	2.701	2.972	3.073	2.892	3.097	2.962	2.448

Fonte: adaptado de ANTT (2022).

Para o cálculo da frequência (número de vezes que cada trem passa por uma determinada posição da ferrovia em um dia) (Equação 10), foi necessário utilizar o dado de extensão de cada ferrovia, obtido no Portal da ANTT (ANTT, 2023). Sendo de 164 km para a Ferrovia Tereza Cristina (FTC) e de 1201 km, para a Rumo Malha Sul (RMS).

$$\text{Frequência} = \left(\frac{\text{Distância total percorrida (km)}}{Comprimento\ da\ ferrovia\ (km)}\right) \qquad \text{Equação 10}$$

Com a distância entre os pontos obtida do shapefile das ferrovias e a frequência calculou-se a distância percorrida pelos trens em cada segmento de dois pontos ao longo da ferrovia. Os valores apresentados na tabela 11 consideram a distância entre os segmentos de reta de 1 km.

Tabela 11 – Valores que consideram a distância entre os segmentos de reta de 1 km.

Ferrovia	Tereza Cristina	Rumo
Número de trens/dia	35,13	91,62
Distância percorrida (km) para cada trem/dia	241,56	578,42
Consumo de combustível (em Marcha 4) L/h	312,70	312,70
Consumo de combustível km/L	0,08	0,08
Fator de emissão (kg CO_2/kg)	3,04	3,04
Distância total percorrida	8485,51	52994,21
Frequência	51,74	44,13
Consumo [L/(dia)]	646,76	551,56

Posteriormente, foi possível realizar o cálculo do consumo de combustível por dia (Equação 11).

$$\text{Consumo (L/dia)} = \left(\frac{\text{Frequencia } \left(\frac{\text{L}}{\text{dia}}\right) \times \textit{distância entre dois pontos}}{\textit{Consumo de combustível km/L}}\right) \qquad \text{Equação 11}$$

Os dados de emissão de CO_2 das concessionárias em estudo foram obtidos no 1º inventário nacional de emissões atmosféricas do transporte ferroviário de cargas (ANTT,2011). Deste modo, foi possível calcular a emissão total de CO_2 no ano (Tabela 12).

Tabela 12 - Emissão total de cada poluente (t/ano).

Poluente	Rumo Malha Sul (t/ano)	Ferrovia Tereza Cristina (t/ano)	Total (t/ano)
CO_2	395.400,0	3.100,0	398.500

Fonte: adaptado de ANTT (2011)

Assim, considerando os valores da Tabela 13, juntamente com o consumo total de combustível calculado (L) foi possível calcular as emissões totais (g/L), considerando 87% de Diesel e 13% de Biodiesel, que são dados de entrada no modelo, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Emissões totais de CO_2 (g/L).

	Emissões de CO_2 (g/L)
Diesel	2264,50
Biodiesel	338,37

O fator de emissão da emissão ferroviária ($kgCO_2/kg$) foi calculado considerando os valores contidos na ferramenta GHG Protocol para o Diesel (2,60 kg CO_2/L) e Biodisel (2,43 kg CO_2/L). Para a inserção no modelo realizou-se a conversão utilizando a densidade do Diesel (SILVA *et al*., 2020) e do Biodisel (ZUNIGA *et al.*, 2011), utilizando a equação de densidade (Equação 12).

$$\text{Densidade} = \frac{Massa}{Volume} \qquad \text{Equação 12}$$

Uma vez que o Diesel é composto por 13% de Biodisel foi necessário realizar uma ponderação para a obtenção do valor final do fator de emissão, que foi de 3,044 $kgCO_2/kg$.

3.5 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Com os dados de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) obtidos para cada cenário foi avaliada qual a contribuição destes sobre os elementos meteorológicos, objetivando avaliar o impacto na variação climática em nível estadual, nacional e global. Para tanto, foi tomado como base a metodologia de Luiz (2022), que considera o método de Ellis (2013).

O modelo de Ellis (2013), considera qual o impacto nos elementos meteorológicos, levando em consideração as diferenças de emissões com o aumento

de temperatura. A equação 13 representa a variação da temperatura considerando uma concentração de CO_2 inicial (C_0) para a final (C), em partes por milhão.

$$\Delta T = 1.66 \ln (C/C_0) \qquad \text{Equação 13}$$

Onde:

ΔT = é a variação da temperatura global (ºC);

C = concentração final de CO_2; que será utilizada para estimar o aumento da temperatura (ppm);

C_0 = concentração inicial de CO_2 (ppm).

Os autores afirmam que para a obtenção do aumento de temperatura ocasionada pela alteração de concentração de CO_2 na atmosfera é necessário realizar o balanço de energia, uma vez que a duplicação da concentração de CO_2 na atmosfera aumenta a opacidade da mesma para radiar calor. Assim, há uma redução da reflexão para o espaço em aproximadamente 4 Watts/m². Se aplicado na equação acima a duplicação da concentração de CO_2 (C=2 C0) tem-se que o aumento de temperatura resultante seria de 1,2ºC.

Stephens e Ellis (2008), estudaram que há relação entre aumento da concentração de CO_2 com mudanças na precipitação, vapor d'água e nuvens, por exemplo. Como resultado, os autores afirmam que as mudanças nos regimes de precipitação possuem relação com o aumento da conversão de vapor d'água em chuva.

4 RESULTADOS

4.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE COM MAIS BAIXA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS AOS PORTOS DE SANTA CATARINA E AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS

Neste tópico serão citados os resultados dos dois primeiros objetivos propostos neste estudo: Proposição de cenários de modais de transporte menos poluentes aos portos de Santa Catarina; e Avaliação da emissão de gases do efeito estufa (GEE) dos cenários por meio de simulação dos modais de demandas futuras. A partir dos dados descritos abaixo foi possível calcular as variações de emissão de GEE para cada um dos cenários propostos na Tabela 6.

Os dados de movimentação de carga, disponíveis no Estatístico Aquaviário 2.1.4 da ANTAQ, bem como os cenários propostos foram utilizados para estimar a quantidade de carga transportada, para cada tipo de modal, no ano de 2020. A partir destes dados foi possível estimar a quantidade de caminhões necessários, utilizando os dados de capacidade de carga de cada tipo de caminhão (Tabela 7), para o cálculo da quantidade de caminhões necessários (Equação 1).

O consumo de combustível foi calculado por meio da Equação 2, onde foi considerada a distância percorrida de 623 km e a eficiência do motor, conforme Tabela 7, bem como a quantidade de caminhões calculada anteriormente.

As Tabelas 14 a 19 demonstram os resultados de quantidade de carga transportada (ton), quantidade de caminhões (un) e quantidade de consumo de combustível (L) considerando cada um dos cenários.

Tabela 14 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário atual (87,90%).

CENÁRIO ATUAL				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	21.094.637	740.163	76.853.559
Granel Sólido	13.677.871	12.022.849	353.613	100.136.827
Granel líquido e gasoso	10.833.900	9.522.998	297.594	47.538.684
Carga Geral	3.300.556	2.901.189	156.821	27.914.140

Tabela 15 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 1 (85%).

CENÁRIO 1				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	20.398.682	715.743	74.318.004
Granel Sólido	13.677.871	11.626.190	341.947	96.833.109
Granel líquido e gasoso	10.833.900	9.208.815	287.775	45.970.286
Carga Geral	3.300.556	2.805.473	151.647	26.993.196

Tabela 16 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 2 (80%).

CENÁRIO 2				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	19.198.759	673.641	69.946.357
Granel Sólido	13.677.871	10.942.297	321.832	91.137.044
Granel líquido e gasoso	10.833.900	8.667.120	270.848	43.266.152
Carga Geral	3.300.556	2.640.445	142.727	25.405.361

Tabela 17 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 3 (73%).

CENÁRIO 3				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	17.518.868	614.697	63.826.050
Granel Sólido	13.677.871	9.984.846	293.672	83.162.553
Granel líquido e gasoso	10.833.900	7.908.747	247.148	39.480.364
Carga Geral	3.300.556	2.409.406	130.238	23.182.392

Tabela 18 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 4 (65%).

CENÁRIO 4				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	15.598.992	547.333	56.831.415
Granel Sólido	13.677.871	8.890.616	261.489	74.048.848
Granel líquido e gasoso	10.833.900	7.042.035	220.064	35.153.748
Carga Geral	3.300.556	2.145.361	115.965	20.641.856

Tabela 19 - Quantidade de caminhões e consumo de combustível do modal Rodoviário, para o cenário 5 (50%).

CENÁRIO 5				
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual (Ton)**	**Rodoviário**	
			Quantidade de caminhões (un)	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	11.999.225	421.025	43.716.473
Granel Sólido	13.677.871	6.838.936	201.145	56.960.653
Granel líquido e gasoso	10.833.900	5.416.950	169.280	27.041.345
Carga Geral	3.300.556	1.650.278	89.204	15.878.350

Da mesma forma, os dados foram calculados para o modal ferroviário, considerando as representatividades de cada cenário, conforme Tabela 6. Após realizar o cálculo do percentual relativo ao transporte ferroviário, estes dados foram utilizados para calcular o número de vagões que seriam necessários para atender a demanda (Equação 4), o número de viagens com locomotivas (Equação 5) e, por fim, o consumo de combustível necessário (Equação 6). Os resultados para cada cenário do modal ferroviário podem ser observados nas Tabelas 20 a 25.

Tabela 20 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário atual (12,10%).

CENÁRIO ATUAL					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	2.903.812	38.208	728	5.667.528
Granel Sólido	13.677.871	1.655.022	21.777	415	3.230.197
Granel líquido e gasoso	10.833.900	1.310.902	17.249	329	2.558.559
Carga Geral	3.300.556	399.367	5.255	100	779.467

Tabela 21 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 1 (15%).

CENÁRIO 1					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	3.599.767	47.365	902	7.025.862
Granel Sólido	13.677.871	2.051.681	26.996	514	4.004.377
Granel líquido e gasoso	10.833.900	1.625.085	21.383	407	3.171.767
Carga Geral	3.300.556	495.083	6.514	124	966.281

Tabela 22 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 2 (20%).

CENÁRIO 2					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	4.799.690	63.154	1.203	9.367.816
Granel Sólido	13.677.871	2.735.574	35.994	686	5.339.169
Granel líquido e gasoso	10.833.900	2.166.780	28.510	543	4.229.022
Carga Geral	3.300.556	660.111	8.686	165	1.288.375

Tabela 23 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 3 (27%).

CENÁRIO 3					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	6.479.581	85.258	1.624	12.646.551
Granel Sólido	13.677.871	3.693.025	48.592	926	7.207.878
Granel líquido e gasoso	10.833.900	2.925.153	38.489	733	5.709.180
Carga Geral	3.300.556	891.150	11.726	223	1.739.306

Tabela 24 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 4 (35%).

CENÁRIO 4					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	8.399.457	110.519	2.105	16.393.677
Granel Sólido	13.677.871	4.787.255	62.990	1.200	9.343.546
Granel líquido e gasoso	10.833.900	3.791.865	49.893	950	7.400.789
Carga Geral	3.300.556	1.155.195	15.200	290	2.254.656

Tabela 25 - Quantidade de locomotivas e consumo de combustível do modal Ferroviário, para o cenário 5 (50%).

CENÁRIO 5					
Tipo de carga	**Quantidade (Ton)**	**% relativo ao cenário atual**	**Ferroviário**		
			Nº de vagões	**Nº de viagens com locomotivas**	**Consumo de combustível (l)**
Conteinerizada	23.998.449	11.999.225	157.885	3.007	23.419.539
Granel Sólido	13.677.871	6.838.936	89.986	1.714	13.347.922
Granel líquido e gasoso	10.833.900	5.416.950	71.276	1.358	10.572.556
Carga Geral	3.300.556	1.650.278	21.714	414	3.220.937

Comparando os dados entre os modais, é possível afirmar que para transportar uma mesma quantidade de carga, o número de caminhões necessários é 140 vezes maior do que de trens e, consequentemente, aumentando o número de viagens e o consumo de combustível, fatores determinantes para as emissões de Gases de Efeito Estufa.

De modo a estimar as emissões para cada cenário, para os modais rodoviário, foi utilizada a Planilha do Programa GHG Protocol, considerando apenas a aba de combustão móvel, do Escopo 1. Nesta planilha foram inseridos os dados de consumo

de combustível, tipo de combustível e de carga para realizar as conversões em emissões (Tabelas 26 a 31) de: CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), Emissões de N_2O (t), Emissões totais (t CO_{2e}) e CO_2 biogênico (t).

Tabela 26 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário atual.

CENÁRIO ATUAL					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	177.377,50	12,33	9,61	180.550,47	21.174,18
Carga Granel Sólido	231.115,13	16,06	12,53	235.249,37	27.589,03
Carga Granel líquido e gasoso	109.718,97	7,63	5,95	111.681,64	13.097,54
Carga Geral	64.425,65	4,48	3,49	65.578,11	7.690,72
Total	**582.637,25**	**40,50**	**31,58**	**593.059,57**	**69.551,47**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	13.080,62	0,91	0,71	13.314,61	1.561,48
Carga Granel Sólido	7.455,27	0,52	0,40	7.588,64	889,96
Carga Granel líquido e gasoso	5.905,14	0,41	0,32	6.010,77	704,92
Carga Geral	1.799,00	0,13	0,10	1.831,19	214,75
Total	**28.240,03**	**1,96**	**1,53**	**28.745,35**	**3.371,11**

Tabela 27 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 1.

CENÁRIO 1					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	171.525,46	11,92	9,30	174.593,74	20.475,60
Carga Granel Sólido	223.490,17	15,53	12,11	227.488,01	26.678,81
Carga Granel líquido e gasoso	106.099,11	7,37	5,75	107.997,04	12.665,43
Carga Geral	62.300,12	4,33	3,38	63.414,55	7.436,99
Total	**563.414,86**	**39,16**	**30,54**	**573.493,26**	**67.256,83**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	16.215,64	1,13	0,88	16.505,71	1.935,72
Carga Granel Sólido	9.242,07	0,64	0,50	9.407,40	1.103,26
Carga Granel líquido e gasoso	7.320,42	0,51	0,40	7.451,37	873,86
Carga Geral	2.230,17	0,16	0,12	2.270,06	266,22
Total	**35.008,30**	**2,43**	**1,90**	**35.634,44**	**4.179,07**

Tabela 28 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 2.

CENÁRIO 2					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	161.435,72	11,22	8,75	164.323,52	19.271,15
Carga Granel Sólido	210.343,69	14,62	11,40	214.106,36	25.109,47
Carga Granel líquido e gasoso	99.857,99	6,94	5,41	101.644,27	11.920,40
Carga Geral	58.635,40	4,08	3,18	59.684,29	6.999,52
Total	**530.272,81**	**36,86**	**28,74**	**539.758,41**	**63.300,54**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	21.620,86	1,50	1,17	22.007,61	2.580,96
Carga Granel Sólido	12.322,77	0,86	0,67	12.543,20	1.471,01
Carga Granel líquido e gasoso	9.760,56	0,68	0,53	9.935,15	1.165,15
Carga Geral	2.973,56	0,21	0,16	3.026,75	354,96
Total	**46.677,74**	**3,24**	**2,53**	**47.512,78**	**5.572,09**

Tabela 29 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 3.

CENÁRIO 3					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	147.310,10	10,24	7,98	149.945,21	17.584,93
Carga Granel Sólido	191.938,62	13,34	10,40	195.372,06	22.912,39
Carga Granel líquido e gasoso	91.120,42	6,33	4,94	92.750,40	10.877,37
Carga Geral	53.504,81	3,72	2,90	54.461,91	6.387,06
Total	**483.873,94**	**33,63**	**26,22**	**492.529,47**	**57.761,75**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	29.188,16	2,03	1,58	29.710,28	3.484,29
Carga Granel Sólido	16.635,73	1,16	0,90	16.933,32	1.985,87
Carga Granel líquido e gasoso	13.176,75	0,92	0,71	13.412,46	1.572,96
Carga Geral	4.014,31	0,28	0,22	4.086,12	479,20
Total	**63.014,95**	**4,38**	**3,42**	**64.142,12**	**7.522,32**

Tabela 30 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 4.

CENÁRIO 4					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	131.166,53	9,12	7,11	133.512,86	15.657,81
Carga Granel Sólido	170.904,25	11,88	9,26	173.961,42	20.401,45
Carga Granel líquido e gasoso	81.134,62	5,64	4,40	82.585,97	9.685,33
Carga Geral	47.641,27	3,31	2,58	48.493,48	5.687,11
Total	**430.846,66**	**29,95**	**23,35**	**438.553,88**	**51.431,69**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	37.836,50	2,63	2,05	38.513,33	4.516,68
Carga Granel Sólido	21.564,84	1,50	1,17	21.950,60	2.574,27
Carga Granel líquido e gasoso	17.080,97	1,19	0,93	17.386,52	2.039,02
Carga Geral	5.203,73	0,36	0,28	5.296,82	621,19
Total	**81.686,04**	**5,68**	**4,43**	**83.147,21**	**9.751,15**

Tabela 31 – Emissões de CO_2 (t) fóssil, CH_4 (t), N_2O (t), totais (tCO_{2e}) e CO_2 biogênico (t) dos modais rodoviários e Ferroviários, para o cenário 5.

CENÁRIO 5					
RODOVIÁRIO					
Tipo de Carga	**Emissões de CO_2 (t) fóssil**	**Emissões de CH_4 (t)**	**Emissões de N_2O (t)**	**Emissões totais (t CO_{2e})**	**Emissões de CO_2 biogênico (t)**
Carga Conteinerizada	100.897,33	7,01	5,47	102.702,20	12.044,47
Carga Granel Sólido	131.464,81	9,14	7,12	133.816,48	15.693,42
Carga Granel líquido e gasoso	62.411,24	4,34	3,38	63.527,67	7.450,25
Carga Geral	36.647,13	2,55	1,99	37.302,68	4.374,70
Total	**331.420,51**	**23,04**	**17,96**	**337.349,06**	**39.562,84**
FERROVIÁRIO					
Carga Conteinerizada	54.052,14	3,76	2,93	55.019,04	6.452,40
Carga Granel Sólido	30.806,92	2,14	1,67	31.358,00	3.677,53
Carga Granel líquido e gasoso	24.401,39	1,70	1,32	24.837,89	2.912,88
Carga Geral	7.433,90	0,52	0,40	7.566,88	887,41
Total	**116.694,35**	**8,11**	**6,32**	**118.781,67**	**13.930,22**

De acordo com a metodologia GHG Protocol a emissão de CO_2 biogênico se dá em virtude da queima da biomassa, presente nos combustíveis em decorrência da fração de etanol, considerado biocombustível, no diesel (FGV, 2016). As emissões totais, expressas em tCO_2e dizem respeito a uma unidade universal utilizada, que considera a conversão dos demais gases emitidos nesta variável (indicadora de potencial de aquecimento global de uma unidade de CO_2) (BCSD PORTUGAL; WBCSD; WRI, 2008).

O CO_2 fóssil está relacionado a fonte de emissão se dá pela queima incompleta de combustíveis fósseis, neste caso o Diesel. Ainda, nesta queima gera outros GEE como é o caso do Metano (CH_4) e Óxido Nitroso (N_2O) (FONSECA, 2023).

Como forma de facilitar os comparativos entre os resultados foi considerado apenas as emissões totais (tCO_{2e}) para ambos os modais, assim pode ser verificado (Tabela 32) que para o modal rodoviário a Carga tipo Granel sólido é a responsável pela maior parcela de emissões, entre todos os cenários, em virtude da capacidade de carga do caminhão necessário para este tipo de transporte, bem como pela eficiência deste ser a menor entre os quatro tipos de cargas consideradas. A carga conteinerizada representa o segundo lugar em emissões, mesmo sendo o maior volume movimentado nos portos catarinenses no ano de 2020, sendo que o motivo também está relacionado com as características de cada caminhão. Por fim, na sequência de emissões totais (tCO_{2e}) tem-se o tipo de carga Granel líquido e gasoso e carga geral, respectivamente.

Tabela 32 – Emissões totais (tCO_{2e}) para os modais rodoviário e ferroviário, considerando os tipos de carga: Conteinerizada, Granel Sólido, Granel líquido e gasoso e Geral.

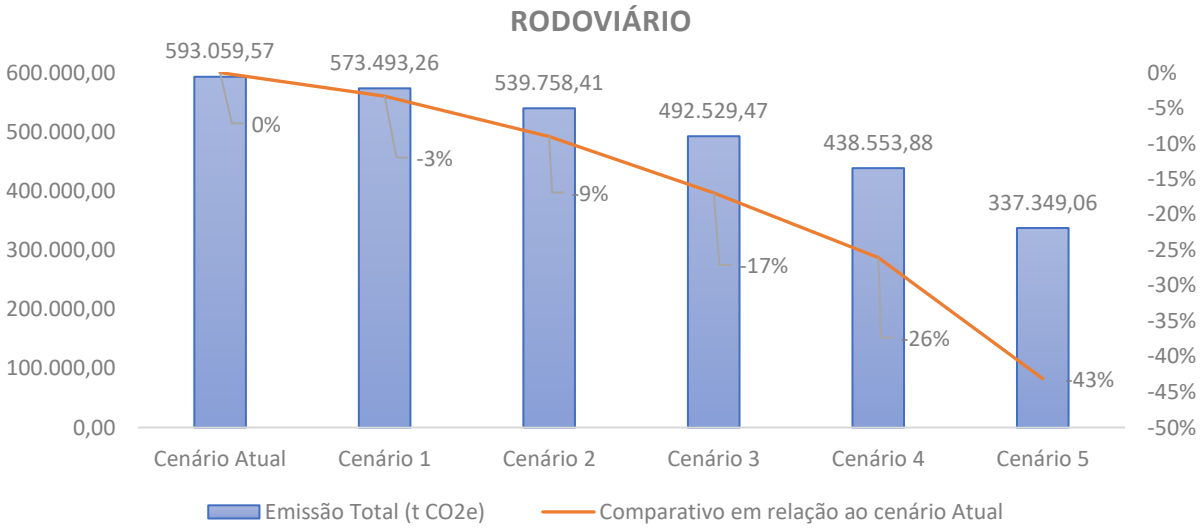
RODOVIÁRIO						
Tipo de Carga	**Cenário Atual**	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**	**Cenário 5**
Conteinerizada	180.550,47	174.593,74	164.323,52	149.945,21	133.512,86	102.702,20
Granel Sólido	235.249,37	227.488,01	214.106,36	195.372,06	195.372,06	133.816,48
Granel líquido e gasoso	111.681,64	107.997,04	101.644,27	92.750,40	82.585,97	63.527,67
Geral	65.578,11	63.414,55	59.684,29	54.461,91	48.493,48	37.302,68
Total	**593.059,57**	**573.493,26**	**539.758,41**	**492.529,47**	**438.553,88**	**337.349,06**
FERROVIÁRIO						
Conteinerizada	13.314,61	16.505,71	22.007,61	29.710,28	38.513,33	55.019,04
Granel Sólido	7.588,64	9.407,40	12.543,20	16.933,32	21.950,60	31.358,00
Granel líquido e gasoso	6.010,77	7.451,37	9.935,15	13.412,46	17.386,52	24.837,89
Geral	1.831,19	2.270,06	3.026,75	4.086,12	5.296,82	7.566,88
Total	**28.745,35**	**35.634,44**	**47.512,78**	**64.142,12**	**83.147,21**	**118.781,67**

Em relação ao modal ferroviário foi considerado que cada vagão pode transportar até 76 toneladas (Tabela 7). Com isso os dados de transporte foram

proporcionais, fazendo com que os tipos de carga de maior movimentação, no ano de 2020, fossem os que apresentaram o maior resultado de emissões totais (CO_{2e}), ou seja, carga conteinerizada, granel sólido, granel líquido e gasoso e geral.

Por meio do comparativo entre as emissões totais (CO_{2e}) de cada cenário do modal rodoviário, em relação ao cenário atual, observa-se uma redução entre os mesmos, sendo que neste caso considerou-se o somatório de emissões por tipo de carga (Figura 15). A medida em que ocorre uma redução nas emissões, em virtude da diminuição da utilização deste modal, ocorre uma redução de até 43% das emissões de GEE, se comparado o cenário 5 com o atual.

Figura 15 – Emissão totais (tCO_{2e}) para o modal rodoviário para cada um dos cenários e redução das emissões em relação ao cenário atual.

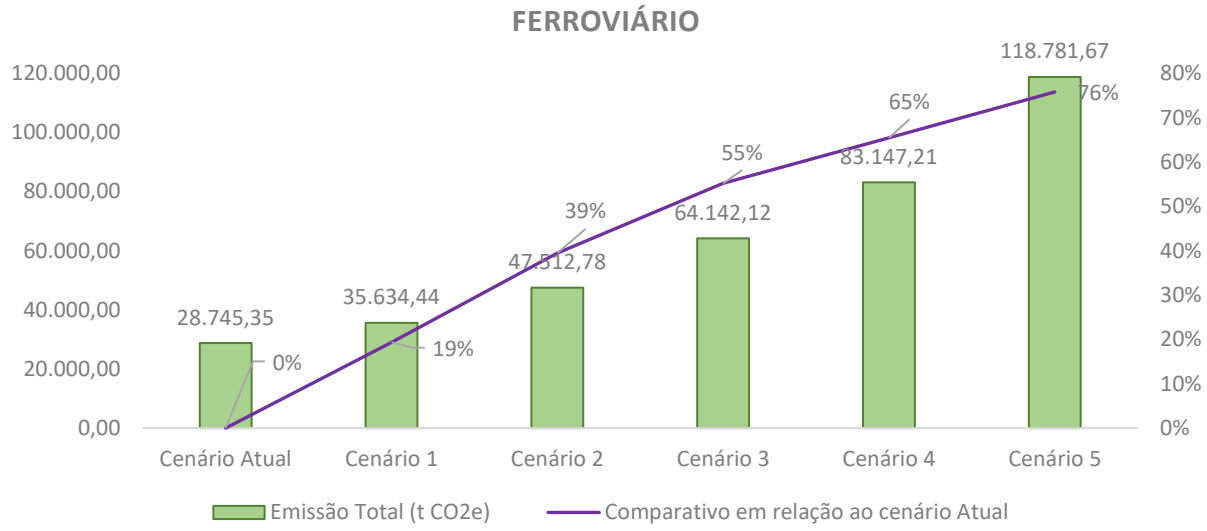


O comparativo supracitado foi realizado também para o modal ferroviário, levando em consideração o somatório de emissões totais (tCO_{2e}) de todos os tipos de carga, para cada cenário (Figura 16). Neste caso, com o incremento do uso de ferrovias houve aumento da emissão em 76%, no cenário 5, levando em conta que neste caso a utilização do modal ferroviário seria de aproximadamente mais 38% do que no cenário atual.

Contudo, mesmo este número parecendo expressivo deve-se considerar que o total emitido neste caso seria de 118.781,67 tCO_{2e} para o cenário 5 do modal ferroviário. Já o modal rodoviário a emissão total neste cenário é de 337.349,06 t CO_{2e}. Sendo assim, mesmo com a redução em 50% do transporte de cargas pelo modal

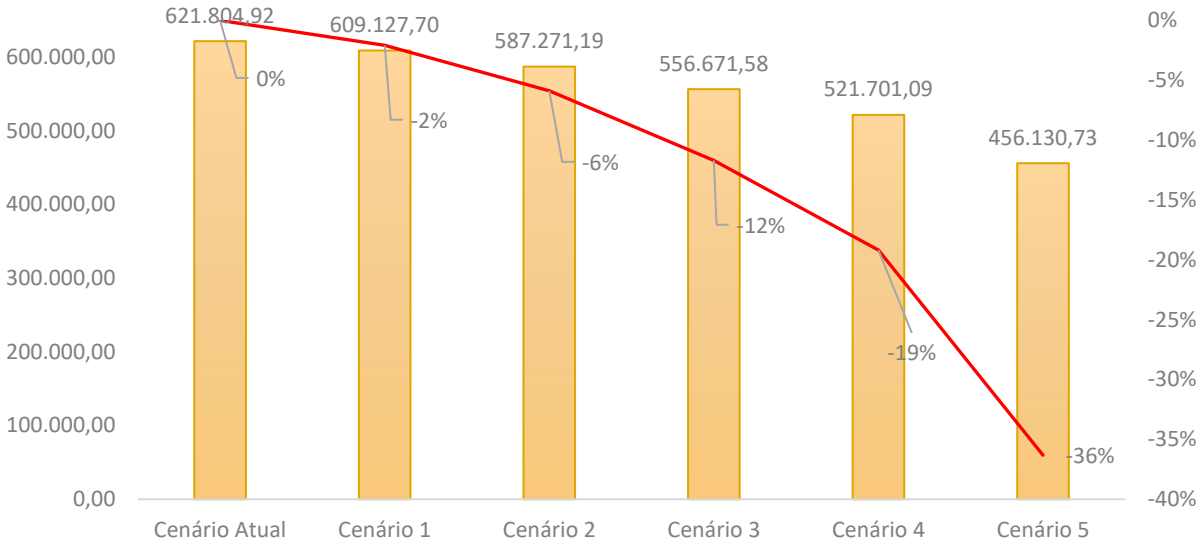
rodoviário e aumento de 50% do modal ferroviário, a quantidade total de emissão é muito maior no modal rodoviário, uma vez que a capacidade de carga dos caminhões é menor e a necessidade de mais viagem é maior, em comparação com o ferroviário.

Figura 16 – Emissão totais (tCO_{2e}) para o modal ferroviário para cada um dos cenários e redução das emissões em relação ao cenário atual.



O retrato final de emissões totais de cada cenário, considerando o somatório de emissões os modais ferroviário e rodoviário podem ser visualizados na Figura 17. Observa-se reduções significativas de emissões totais que chegam a até 36% no cenário 5, sendo que este total representa 165.674,19 t CO_{2e} em relação ao cenário atual. As reduções de emissões citadas dizem respeito as implantações propostas de incremento de utilização do modal ferroviário e a redução da utilização do rodoviário.

Figura 17 – Emissão totais (tCO_{2e}) considerando o somatório total dos modais rodoviário e ferroviário, para cada cenário.



4.2 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA

As emissões resultantes da aplicação dos dados na Planilha do Programa GHG Protocol em comparação com as informações de exportações por setor produtivo (Tabela 8), possibilitaram avaliar a participação de cada um no que diz respeito as emissões de GEE.

O setor alimentício é que o possui maior representatividade em todos os cenários, com emissão de 217.009,92 tCO_{2e} no cenário atual, seguido pelo setor de Máquinas, Aparelhos e Mat. Elétricos 60.315,08 tCO_{2e}, de Máquinas e Equipamentos 58.449,66 tCO_{2e} de Madeira 3.264.078,89 tCO_{2e} (Tabela 33). Os demais setores possuem representatividade menor que 5,5% cada.

Tabela 33 – Representatividade das Emissões totais (tCO_{2e}) para cada setor produtivo.

Setor	Cenário atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Alimentar	217.009,92	212.585,57	204.957,64	194.278,38	182.073,68	159.189,62
Têxtil e Vestuário	11.814,29	11.573,43	11.158,15	10.576,76	9.912,32	8.666,48
Máquinas e Equipamentos	58.449,66	57.258,00	55.203,49	52.327,13	49.039,90	42.876,29
Metalurgia e Produtos de Metal	18.032,34	17.664,70	17.030,86	16.143,48	15.129,33	13.227,79
Outros	139.284,30	136.444,60	131.548,75	124.694,43	116.861,04	102.173,28
Cerâmica	8.705,27	8.527,79	8.221,80	7.793,40	7.303,82	6.385,83
Mobiliário	14.301,51	14.009,94	13.507,24	12.803,45	11.999,13	10.491,01
Madeira	39.173,71	38.375,05	36.998,08	35.070,31	32.867,17	28.736,24
Máquinas, Aparelhos e Mat. Elétricos	60.315,08	59.085,39	56.965,30	53.997,14	50.605,01	44.244,68
Produtos de Plástico	4.352,63	4.263,89	4.110,90	3.896,70	3.651,91	3.192,92
Veículos Automotores/ Autopeças	34.199,27	33.502,02	32.299,92	30.616,94	28.693,56	25.087,19
Celulose/Papel	16.166,93	15.837,32	15.269,05	14.473,46	13.564,23	11.859,40

4.3 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS

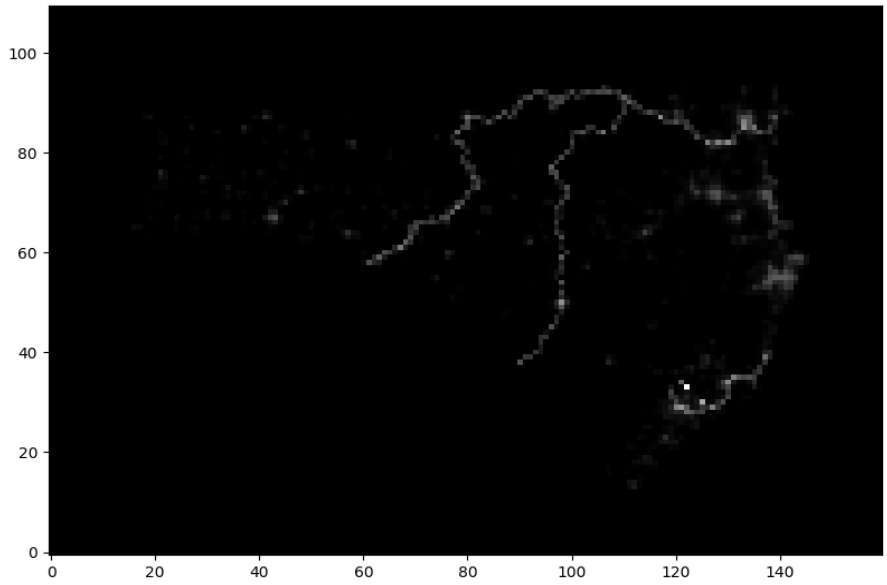
4.3.1 WRF-Chem

A simulação realizada utilizando o modelo WRF-Chem teve por objetivo avaliar emissão de CO_2, ao longo de Santa Catarina, considerando o tráfego de caminhões

e de trens. Destaca-se que a fração de caminhões, neste caso, apenas contém o número de veículos registrados no Estado, ou seja, não considera a entrada de caminhões advindos de outros Estados e que realizam transporte de cargas em Santa Catarina.

Os dados de quantidade de caminhões foram distribuídos ao longo do Estado e, com relação aos trens, foi considerado que estes realizam os mesmos trajetos ao longo das ferrovias. Desta forma, limitando estas informações dentro dos limites de Santa Catarina, foi possível obter o mapa de Intensidade de Luz Noturna (ILN) (Figura 18).

Figura 18 - Imagem de Satélite de Intensidade de Luz Noturna (ILN) considerando a área de estudo.



A distribuição espacial de emissão de dióxido de carbono (CO_2), foi gerada para o dia 23 de novembro de 2020, com início às 21 horas do dia 22 de novembro de 2020 e fim às 20 horas do dia 23 de novembro (Figura 19), como resultado da simulação de modelagem atmosférica realizada no WRF-Chem, onde procurou-se utilizar dados de entrada o mais próximo possível da realidade do estado de Santa Catarina.

Os resultados apresentados no item 4.1, utilizando a ferramenta GHG Protocol, fornecem dados de emissão total de CO_{2eq} considerando todo o Estado de Santa Catarina. Já com o WRF-Chem foi possível que estas estejam espacializadas dentro do território, permitindo algumas considerações complementares para a rota de cargas, no contexto atual, conforme segue.

Por meio da análise da Figura 19 é possível notar que as maiores taxas de emissão de CO_2 estão em 4 e 5 horas da manhã e 15 e 16 horas da tarde. Tal fato se deu em virtude das variações de emissão horárias consideradas na simulação, descritas conforme o estudo de Rafee (2015).

A região litorânea se destaca entre as emissões, em virtudes de serem os locais dos portos em questão (Itajaí, Itapoá, Navegantes, São Francisco do Sul e Imbituba), assim sendo ponto de convergência das cargas de exportação e importação, que serão movimentadas utilizando por diferentes modais. Além disso, é onde se encontra uma das mais importantes e movimentadas rodovias federais, a BR 101. A rodovia BR 282 e BR 470 também podem ser notadas, em virtude da grande circulação de cargas por caminhão que ocorre por estas.

Na porção Sul está localizada a Ferrovia Tereza Cristina, importante rota de movimentação à Termelétrica de Jorge Lacerda. Fato que chama atenção é que, mesmo sendo considerada umas das menores ferrovias do país, a mesma possui expressão em número de trens formados e quilômetros percorridos. Juntamente com o Norte do Estado, estas regiões são responsáveis pela maior concentração de atividades industriais, como é o caso da indústria cerâmica, têxtil, e metal-mecânica, por exemplo.

A região Oeste do Estado também apresentou emissões expressivas, uma vez que esta é uma importante produtora de diversos produtos da economia catarinense. No Oeste encontra-se a grande produção de carnes, aves, suínos e leite de Santa Catarina. Assim, o escoamento desta produção para os outros locais do país e do mundo representa a influência nas taxas de emissão. Por fim, a região serrana foi a que apresentou menores emissões no período analisado. A mesma se caracteriza pela indústria de papel e celulose, madeira e móveis.

Os índices de emissão, bem como horários de picos, aqui apresentados seriam maiores caso fosse levado em consideração outros tipos de veículos (como carros, ônibus e motocicletas) que circulam pelo Estado, todavia, este não era o foco do presente estudo.

No que tange as ferrovias, não há diferença entre as emissões ao longo do dia, ou seja, elas são constantes e, isso se dá pois, conforme supracitado, foi considerado que os trens realizam o mesmo trajeto continuamente, em virtude da falta de dados de horários de circulação destes.

A concentração de CO_2 (Figura 20) apresentou valores mais expressivos na região litorânea e central do Estado e, um pouco menos expressiva na região oeste, o que pode ser resultado do baixo número de dias considerado na rodada do WRF-CHEM, ou seja, é possível que com a realização de rodadas do modelo, considerando mais dias, possa ocorrer uma estabilização das concentrações de CO_2.

Figura 19 - Emissão de CO_2 em Santa Catarina, no dia 23 de novembro de 2020.

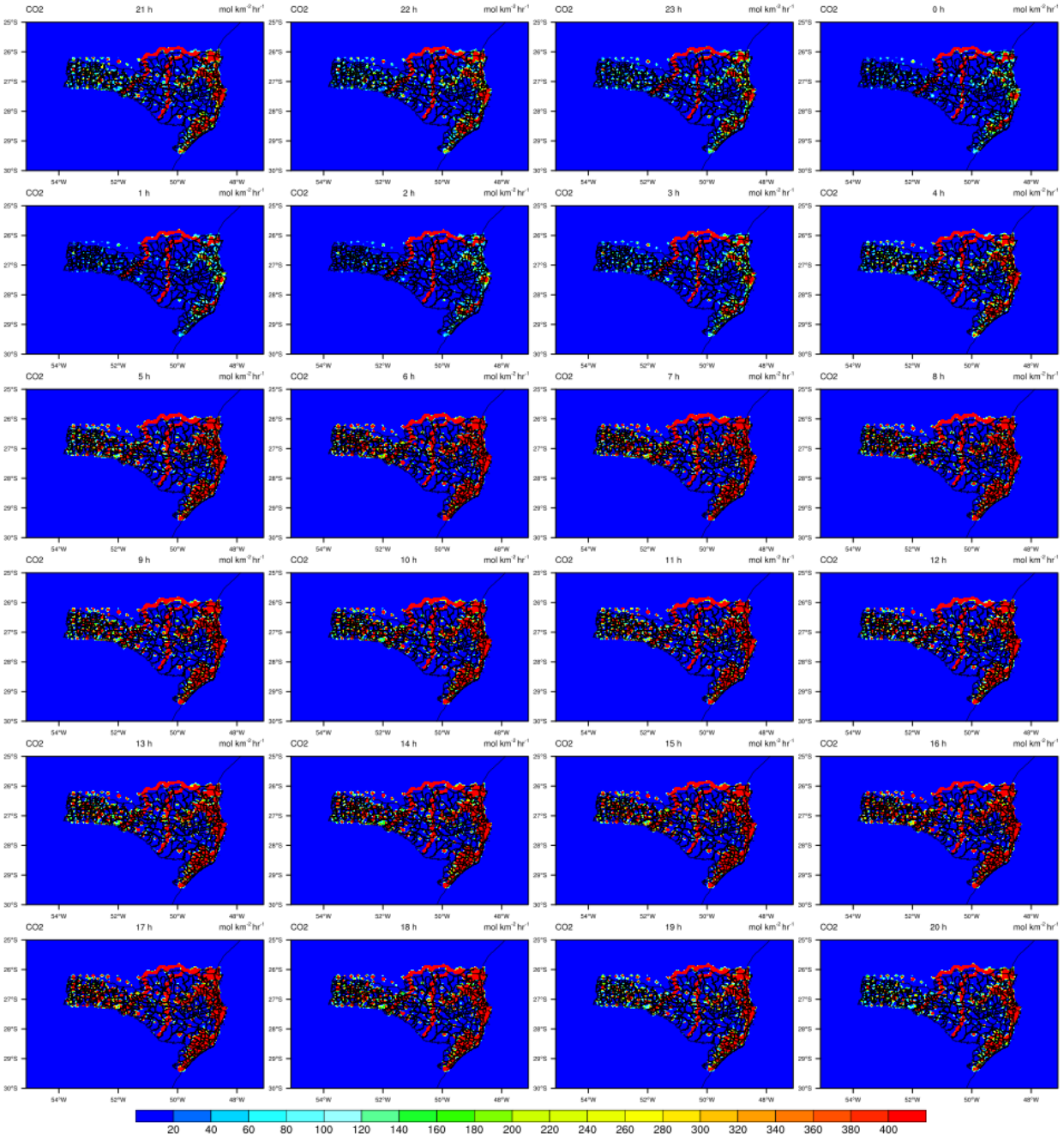
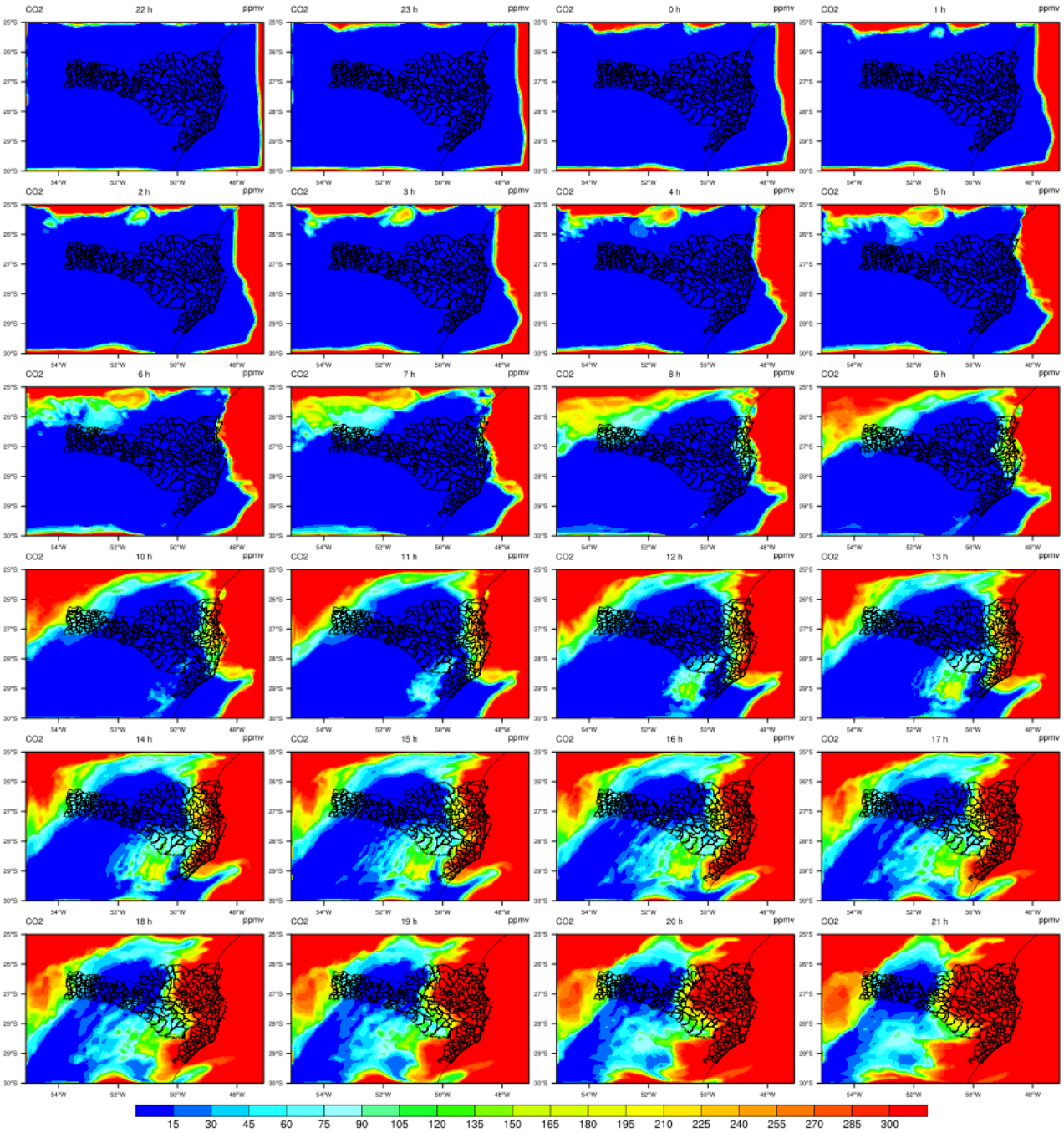


Figura 20 - Concentração de CO_2 ao longo do Estado de Santa Catarina.



4.4 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Para estimar a variação climática para cada um dos cenários propostos, foram utilizados os resultados de emissões totais (t CO_{2e}), bem como o método de Ellis (2013) (Equação 13). A Concentração de CO_2 inicial (C_0) considerada (em nível global) foi de 417,2 ppm, conforme consta no Global Carbon Budget 2022 elaborado

por Friedlingstein *et al*. (2022). O cálculo da concentração final (C) foi realizado utilizando a redução de emissão por cenário (tCO_{2e}), convertida para ppm.

Como os dados primários deste estudo referem-se à movimentação portuária do Estado de Santa Catarina, foi necessário realizar pesquisas de movimentação portuária no Brasil e no mundo. Assim, foi possível realizar a extrapolação dos dados e obter os valores de variação de temperatura para esses âmbitos (Tabelas 34 a 36).

Tabela 34 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Estado de Santa Catarina.

Variável	Cenário atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Redução emissão por cenário (tCO_{2e})	0	-12.677,22	-34.533,73	-65.133,33	-100.103,82	-165.674,19
Redução % estimada	0	-2,08%	-5,88%	-11,70%	-19,19%	-36,32%
Redução em gigatoneladas por ano ($GtCO_{2e}$)	0	-0,00001267722	-0,00003453373	-0,00006513333	-0,00010010382	-0,00016567419
Variação da concentração em ppm por ano	0	0,00000162528	0,00000442740	0,00000835043	0,00001283382	0,00002124028
C_0	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2
C	417,2	417,199998375	417,199995573	417,199991650	417,199987166	417,199978760
ΔT (ºC)	0	-0,00000000647	-0,00000001762	-0,00000003323	-0,00000005106	-0,00000008451

Tabela 35 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Brasil.

Variável	Cenário atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Redução emissão por cenário (tCO_{2e})	0	-273.023,46	-743.737,31	-1.402.747,10	-2.155.890,69	-3.568.049,92
Redução % estimada	0	-2,08%	-5,88%	-11,70%	-19,19%	-36,32%
Redução em gigatoneladas por ano ($GtCO_{2e}$)	0	-0,000273023	-0,000743737	-0,001402747	-0,002155891	-0,00356805
Variação da concentração em ppm por ano	0	0,000035003	0,000095351	0,000179839	0,000276396	0,000457442
C_0	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2
C	417,2	417,199964997	417,199904649	417,199820161	417,199723604	417,199542558
ΔT (ºC)	0	-0,000000139	-0,000000379	-0,000000716	-0,000001100	-0,000001820

Tabela 36 – Redução das emissões totais de CO_{2e} de temperatura, em relação ao Mundo.

Variável	Cenário atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Redução emissão por cenário (tCO_{2e})	0	-1.772.156,98	-4.827.494,51	-9.105.034,63	-13.993.583,98	-23.159.711,48
Redução % estimada	0	-2,08%	-5,88%	-11,70%	-19,19%	-36,32%
Redução em gigatoneladas por ano ($GtCO_{2e}$)	0	-0,001772157	-0,004827495	-0,009105035	-0,013993584	-0,023159711
Variação da concentração em ppm por ano	0	0,0002272	0,00061891	0,001167312	0,001794049	0,002969194
C_0	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2	417,2
C	417,2	417,199772800	417,199381090	417,198832688	417,198205951	417,197030806
ΔT (ºC)	0	-0,000000904	-0,000002463	-0,000004645	-0,000007138	-0,000011814

Por meio da análise dos resultados expostos nas tabelas acima (Tabelas 34 a 36) é possível observar diminuição da temperatura no Estado, Brasil e Mundo, ao longo da implementação das ações dos cenários. Sendo que, para o cenário 5, em nível mundial, a redução de temperatura ficou em aproximadamente -0,000012 ºC. Considerando que, de acordo com o IPCC (2022) a temperatura média global está 1,15ºC acima dos níveis da era pré-industrial, e que o limite estabelecido seria de 1,5ºC, com a adoção dos cenários, os valores de temperatura seriam de 1,149999096ºC (cenário 1); 1,149997537ºC (cenário 2); 1,149995355ºC (cenário 3); 1,149992862ºC (cenário 4); e 1,149988186ºC (cenário 5).

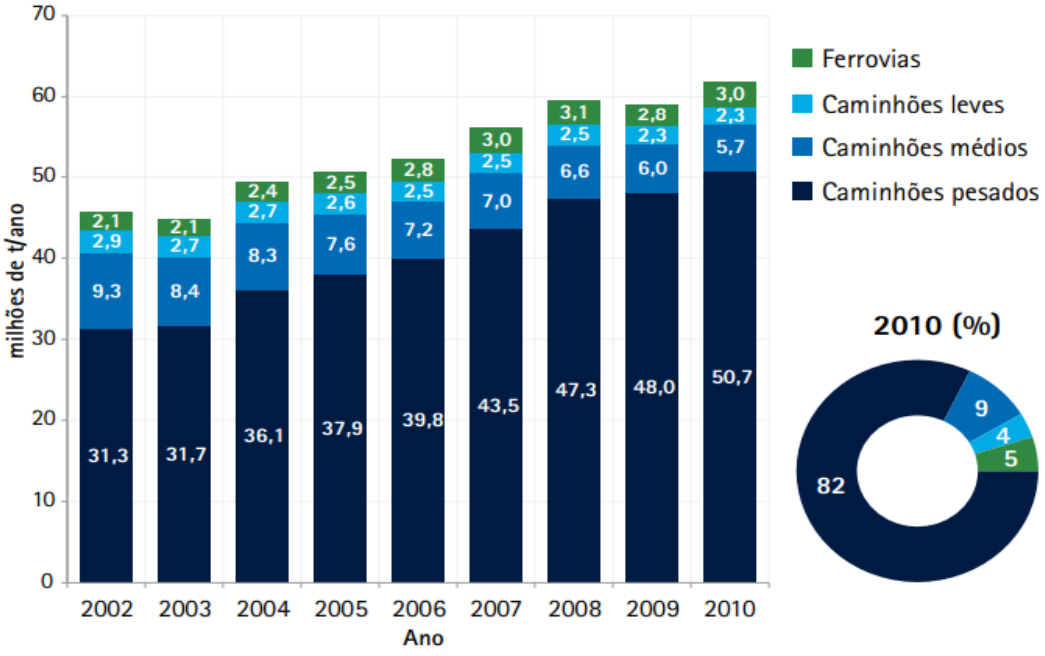
5 DISCUSSÕES

5.1 PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODAIS DE TRANSPORTE MENOS POLUENTES AOS PORTOS DE SANTA CATARINA E AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE) DOS CENÁRIOS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DOS MODAIS DE DEMANDAS FUTURAS

O presente estudo demonstrou as emissões provenientes do transporte de cargas portuárias, utilizando os modais rodoviário e ferroviário, no ano de 2020, para o Estado de Santa Catarina. Foi possível observar que com alterações de cenários de transporte houve mudanças significativas no que diz respeito a emissão de CO_2.

O primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas, realizado pela ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), no ano de 2011, demonstra que o modal ferroviário, em 2010, foi responsável por 5% das emissões de CO_2, para o transporte de cargas no país. Enquanto, o transporte por caminhões foi de: 82% para caminhões pesados, 9% caminhões médios e 4% caminhões leves (Figura 21) (ANTT, 2011).

Figura 21 - Evolução das emissões anuais de CO_2 fóssil do transporte terrestre de cargas.

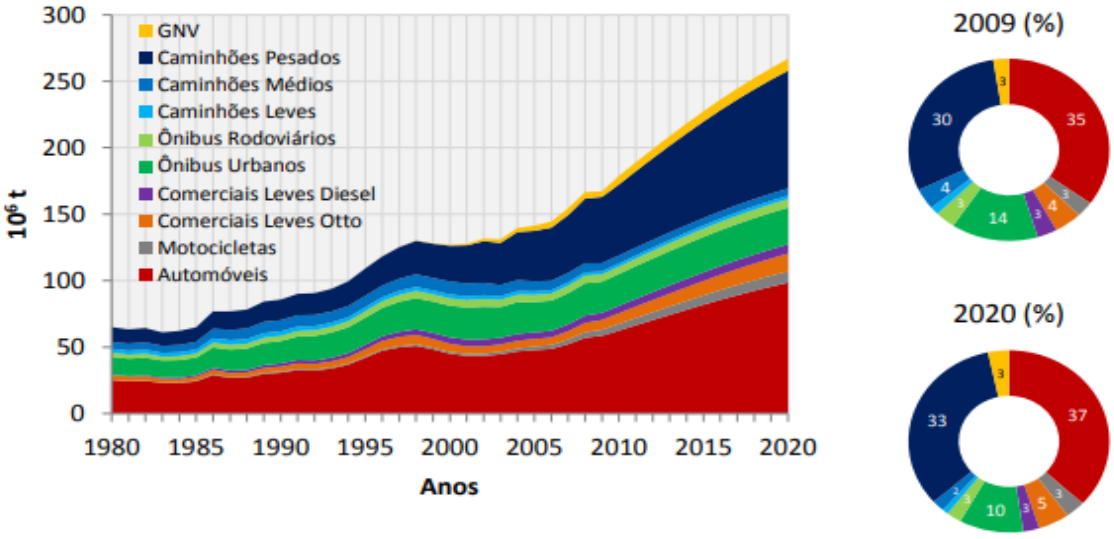


Fonte: ANTT, 2011.

O mesmo estudo cita que os fatores de emissão são muito influenciados pelo tipo de mercadoria transportada, em virtude da sua densidade (peso e volume). Ainda, outros fatores são considerados, tais como: características da infraestrutura ferroviária e da operação das malhas, como estado de manutenção da via férrea, relevo, rampa, dentre outros.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2011), no inventário realizado referente ao transporte rodoviário, foi realizada uma estimativa de emissão de CO_2 de 2009 a 2020 no Brasil, onde o crescimento resultante seria de 60%. O total de emissão para 2020 resultante foi de 270 milhões de toneladas de CO_2, sendo 36% referente a frota de caminhões (Figura 22).

Figura 22 - Comparação do crescimento da emissão de CO_2, considerando a categoria de veículos.

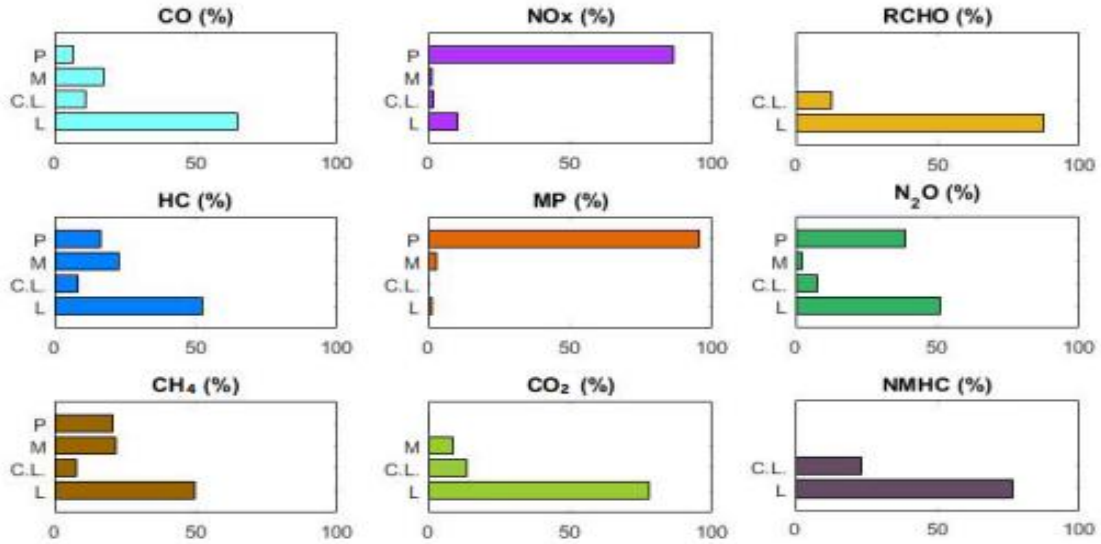


Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

O presente estudo considerou apenas dados totais de emissão para o Estado de Santa Catarina, não realizando relação entre as regiões ou cidades. Este comparativo foi realizado no estudo das Emissões Veiculares no Estado de Santa Catarina, realizado pela Laboratório da Qualidade do Ar, no ano de 2017. Os resultados apontaram que os veículos pesados apresentaram uma quantidade considerável da emissão de poluentes, mesmo representando apenas 4,7% da frota total do Estado. Ainda, estes foram responsáveis pelos maiores resultados referentes

a emissão de NO_2 (40%), NO_x (86%) e Material Particulado (MP) (96%), conforme Figura 23 (UFSC, 2020).

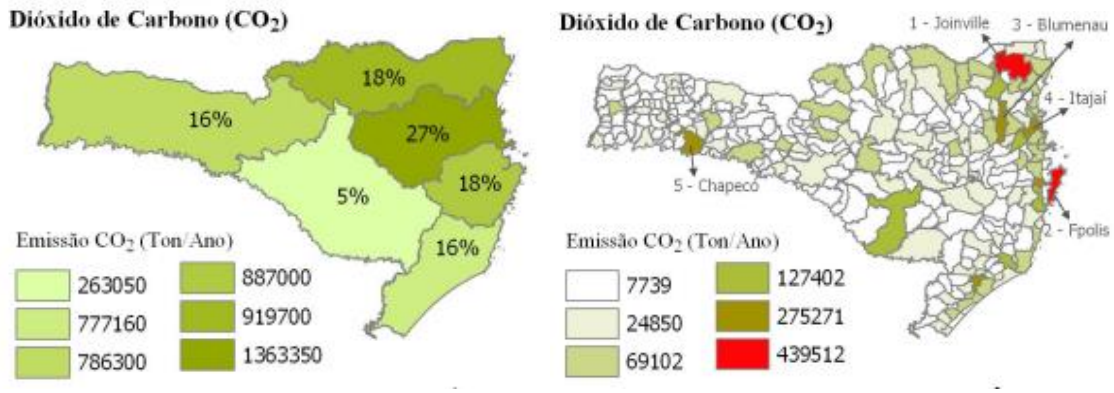
Figura 23 - Percentual de emissão de cada poluente, de acordo com a categoria do veículo: categoria Leves (L), Comerciais Leves (C.L.), Motocicletas (M), Pesados (P).



Fonte: UFSC, 2020.

As maiores taxas de emissões, para todos os poluentes estudados, se dão na região do Vale do Itajaí (Figura 24). A emissão de CO_2 nesta região foi de 1.363.350 (Ton/Ano), frente a um total de 4.996.463 (Ton/Ano) no Estado. As cidades que mais contribuíram para estes resultados foram: Joinville, Florianópolis, Blumenau, Itajaí e Chapecó. Sendo que, estes são os municípios que também apresentaram os maiores resultados para todos os demais poluentes (UFSC, 2020).

Figura 24 – Emissão de CO_2 (Ton/Ano), por regiões do Estado de Santa Catarina e por cidades.



Fonte: adaptado de UFSC (2020).

Em comparação dos resultados do estudo da UFSC (2020) com o presente deve-se considerar que neste estudo não foram considerados emissões de veículo leves e motos, por não realizarem o transporte de cargas até os portos, o que leva a uma proporção de emissões menores. Vasques (2018) cita que, em inventários de emissões veiculares, os valores resultantes das emissões têm relação com o tipo de veículos considerados e a quantidade populacional das cidades, o que, consequentemente, impacta em uma maior frota de veículos e consumo de combustível.

É notório destacar que o perfil industrial das regiões e cidades tem influência direta nas emissões. Assim, regiões mais industrializadas tendem a realizar mais movimentações portuárias para comercialização dos produtos. Porém, a presente configuração do Estado carece em melhorias de infraestrutura e expansão da utilização de outros modais, que trariam grandes benéficos em relação as emissões totais, bem como melhorias de tráfego de outros veículos nas vias. Uma vez que, o fluxo de veículos tende a diminuir utilizando ferrovias.

Em Santa Catarina, a FIESC possui a Câmara para Assuntos de Transporte e Logística, de modo a avaliar as condições de infraestrutura de transporte no Estado. Esta é responsável pela elaboração de vários estudos técnicos a respeito do tema que dão embasamento para a solicitação de aumento de investimentos no setor de transportes. Sendo que, em vários estudos disponibilizados pelo órgão o parecer se refere a necessidade de “Promover o planejamento e investimentos visando a intermodalidade e a eficiência logística, diversificando a matriz de transportes catarinenses” (FIESC, 2021).

O Estado possui uma atividade industrial bastante pulverizada que necessita de apoio logístico tanto para a compra de matéria-prima/insumos, como para a distribuição do produto final. O Custo transporte é citado pela FIESC (2019) como o principal custo das atividades logísticas de transporte. Todavia, vale ser destacado que o aumento de infraestrutura para a ascensão de outros modais mais eficientes é rotineiramente apontado para a solução de diversos problemas, como os de caráter econômico e ambiental.

O estudo de Silva *et al*. (2020) analisou a eficiência entre os modais de transporte ferroviário e rodoviário, onde observou-se que a utilização do modal ferroviário apresentou uma redução de 37% em relação as emissões e 40% em relação aos custos logísticos. Comparando o mesmo trecho e a mesma demanda de

carga os autores verificaram que seria emitido 95 toneladas de CO_2, utilizando 80 vagões e 2 locomotivas. Já se fosse utilizado o modal rodoviário seriam necessários 105 caminhões rodotrem ou 142 caminhões bitrem, emitindo 121 toneladas de CO_2.

Com isso, é fato que as vantagens de ampliação da malha ferroviária em Santa Catarina trariam grandes benefícios para o escoamento da produção do Estado. Alguns projetos já se encontram em andamento, como é o caso da Ferrovia Litorânea e Corredor Ferroviário Leste – Oeste. No entanto, alguns entraves de execução das obras fazem com que os prazos não sejam atingidos e a burocracia para a definição de novas alternativas acaba prejudicando a finalização das obras.

Paralelamente, é de suma importância que haja benefícios para que a indústria automotiva possa investir cada vez mais em tecnologias de descarbonização das frotas. O uso de etanol em veículos flex promove um ganho em relação a emissões de CO_2 para a atmosfera, não havendo perdas significativas de eficiência durante o transporte de materiais.

Mersky e Langer (2021), realizaram um estudo para a ACEEE (American Council for na Energy-Efficient Economy) com o objetivo de investigar de forma preliminar o potencial para reduzir as emissões de GEE de frete de carga, nas próximas décadas, nos Estados Unidos. Os resultados apontaram que em curto e médio prazo a aplicação de ferramentas de Tecnologia da Informação (TI) no setor logístico tem potencial para redução da maior parte de emissão de GEE (em torno de 41%). Ainda, os autores citam que, embora melhorias como eletrificação e automação de veículos apresentem bons resultados a longo prazo, a implantação de TI pode alcançar reduções expressivas em 10 a 15 anos, o que seria essencial para a mudança de cenários.

5.2 ESTIMATIVA DA PARTICIPAÇÃO DAS EMISSÕES DO TRANSPORTE DE CADA SETOR PRODUTIVO PARA OS PORTOS DE SANTA CATARINA

Santa Catarina é caracterizado pela sua diversidade econômica sendo que, os setores que apresentaram maiores concentrações de emissão de CO_{2e} neste estudo, também são os que possuem maior representação no Estado. A distribuição espacial dos setores é constituída por diversas empresas responsáveis pela geração de emprego renda.

Um dos entraves destacados pela Secretaria da Fazenda de Santa Catarina (2022) diz respeito a infraestrutura necessária para o recebimento de materiais e a exportação dos produtos finais. De acordo com Aquino (2016), a interiorização da produção em diversos locais faz com que haja necessidade de melhorias nas estratégias de escoamento, fazendo com que haja reflexos na competitividade dos setores. O autor afirma que o transporte ferroviário é o que possui menor custo, porém possui um fluxo baixo de mercadoria, quando comparado aos demais modais.

O plano estadual de logística e transporte de Santa Catarina (LUNA *et al.*, 2013) realizou uma análise a respeito das obras rodoviárias e ferroviárias e seus impactos na logística de distribuição de cargas. Os resultados apontaram que os investimentos em obras multimodais (ferroviário e rodoviário) trazem mais retornos positivos em termos de custos de transporte, do que se investido nestas obras de maneira isolada.

Park (2020) realizou uma investigação empírica a respeito da qualidade da infraestrutura de transporte e logística para a competitividade. Uma das conclusões do autor é de que “a infraestrutura é um dos principais determinantes dos custos de transporte que são um elemento-chave dos custos comerciais”. Ainda, o estudo cita que cada modal de transporte possui sua importância dentro da logística de distribuição, devendo ser analisada qual a melhor estratégia a ser utilizada para eficiência logística.

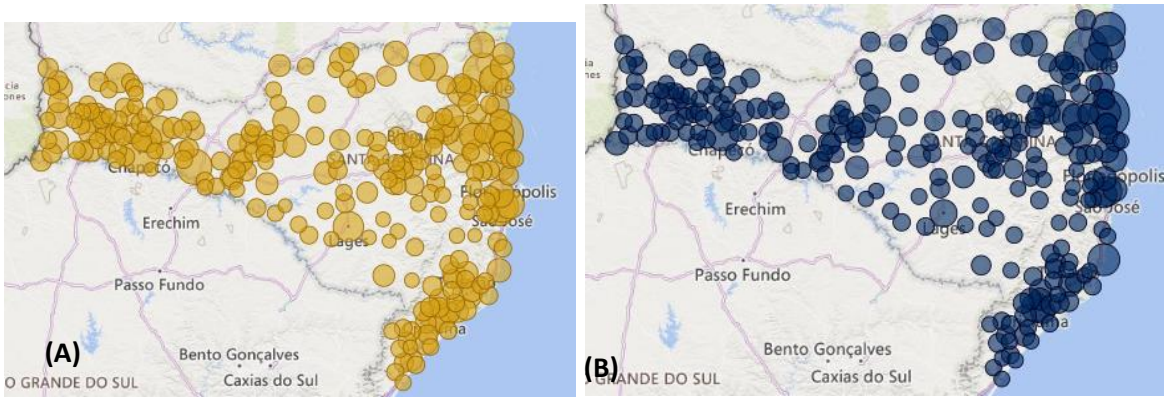
Arbués, Baños e Mayor (2015) afirmam que a infraestrutura de transporta causa impactos nas regiões onde estão disponíveis, bem como na vizinhança. Para chegarem a este resultado, os autores avaliaram os efeitos diretos e indiretos da existência de modais rodoviários, ferroviários e aeroviários, em função da produção de diferentes regiões da Espanha.

FIESC (2019) cita que esta diversidade faz com que a cadeia logística seja complexa, no que diz respeito a aquisição de suprimentos bem como na distribuição. Com isso, o estudo traz que estas características apontam “para a necessidade de haver uma malha integrada, com pontos de concentração de cargas, o que permitirá ganhos de escala, para consolidar um complexo intermodal, que sem dúvidas é condição fundamental para a eficiência da logística do Estado de Santa Catarina”.

5.3 INVENTÁRIO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE), CONSIDERANDO O CENÁRIO MODAL ATUAL DO ESTADO DE SANTA CATARINA, REFERENTE ÀS ROTAS PORTUÁRIAS

A Federação de empresas de Transporte de Carga e Logística no Estado de Santa Catarina (FETRANCESC), disponibiliza dados de quantidade de empresas de transporte de carga, por municípios em Santa Catarina (Figura 25). Analisando as imagens disponibilizadas é possível verificar uma semelhança entre a localização das mesmas e os dados de emissões apresentados nos resultados deste estudo. Sendo as regiões do litoral e oeste com grande destaque.

Figura 25 – (A): Quantidade de CNPJ de empresas transportadoras de carga por municípios; (B): Faturamento das empresas transportadora de cargas por municípios.



Fonte: FETRANCESC, 2023.

Comparando a localização das regiões com maiores emissões de CO_2 deste estudo com o de UFSC (2017), têm-se que há uma convergência entre eles. Os autores afirmam que a região do Vale do Itajaí é a maior emissora em termos gerais, bem como para regiões da Grande Florianópolis, Sul e Norte. Também, apontam que “as cidades catarinenses que possuem maior urbanização e industrialização são as maiores emissoras”, como por exemplo: Joinville, Blumenau, Jaraguá do Sul, Guaramirim, Florianópolis, São José, Criciúma, Lages, Chapecó, Itajaí (UFSC, 2017).

Em relação a localização das atividades econômicas, têm-se que o Estado possui uma distribuição em 5 mesoregiões de expressão, excluindo a região serrana. A distribuição industrial pelas regiões se dá da seguinte maneira: 16,6% Norte Catarinense; 33,2% Vale do Itajaí; 12,6% Grande Florianópolis; 16,0% Sul

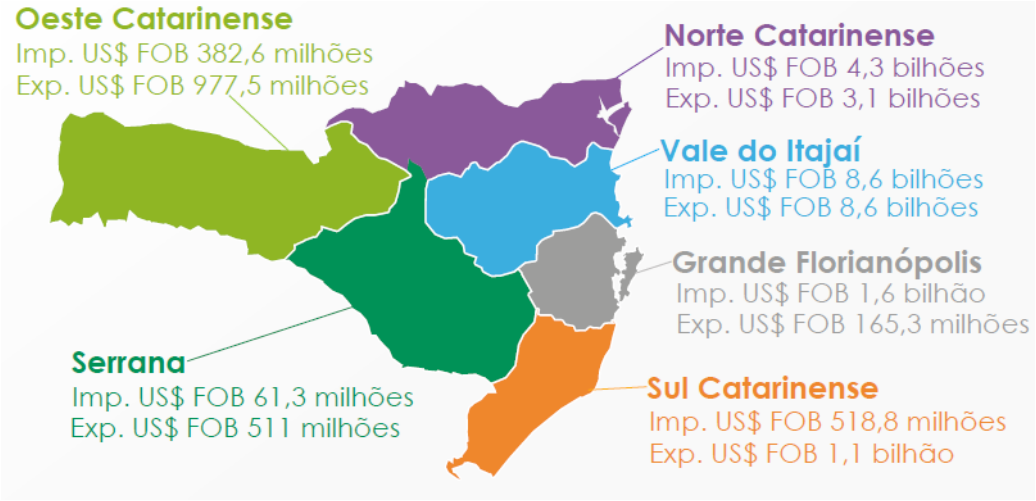
Catarinense; 18% Oeste; 3,7% Serra. Grande parte destas empresas possuem destaque tanto nacional, quanto internacional (FIESC, 2019).

De acordo com a FIESC (2019):

> A pulverizada distribuição espacial da indústria em todo o território catarinense resulta em uma cadeia logística complexa, tanto no que diz respeito ao suprimento, pois demandamos insumos de outros estados e países, assim como para a distribuição, desde que possuímos uma importante participação no fornecimento de produtos industriais no mercado doméstico e internacional.

Tal fato pode ser confirmado observando a corrente de comércio nas regiões (Figura 26). Assim, é possível afirmar que as emissões de gases se relacionam tanto para distribuição de produção, quanto pelo suprimento às diversas localidades.

Figura 26 – Corrente de comércio nas mesorregiões de Santa Catarina.



Fonte: FIESC, 2019.

Conti (2020), realizou um estudo intitulado “Modelagem da dispersão de poluentes na mesorregião do Vale do Paraíba durante a greve nacional dos caminhoneiros em 2018”. Neste a pesquisadora concluiu que há relação direta existente entre a diminuição do tráfego de veículos pesados e a concentração de poluentes relacionados a utilização destes, na atmosfera.

Kovács *et al*. (2021) utilizou a modelagem WRF-Chem para estimar a dispersão atmosférica de poluentes (CO, NO_x, O_3) em Budapeste. Mesmo estes poluentes não sendo foco do presente estudo, entende-se a importância das conclusões dos autores,

que afirmam que a “combinação da modelagem macroscópica do tráfego rodoviário com modelos atmosféricos pode aumentar a eficiência da estimativa da poluição do ar urbana”.

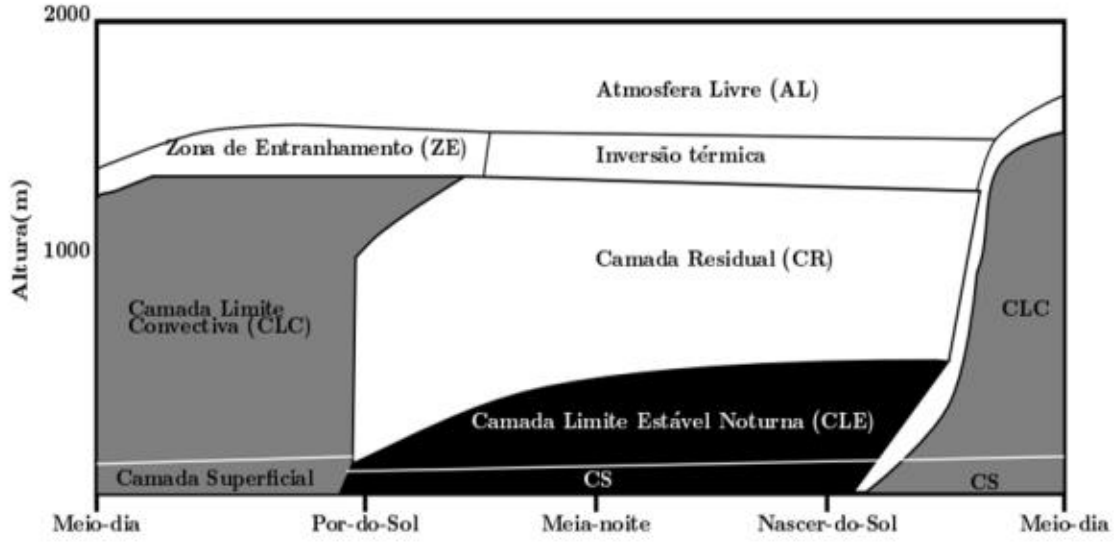
O Inventário de poluentes atmosféricos do transporte rodoviário de Rio de Janeiro sugere como estratégia para a redução das emissões de poluentes atmosféricos a redução da intensidade de uso de veículos e aumento do uso de biodiesel (SOUZA *et al.,* 2013).

No que diz respeito a concentração de dióxido de carbono, os resultados apresentados por esse estudo consideraram apenas um dia de simulação, o que pode não demonstrar uma estabilidade de dispersão deste gás. Todavia, já é possível notar que as concentrações ficaram mais intensas no período noturno, entre 20 e 21h, devido à camada limite noturna (CLN).

Stull (1991) *apud* Alvim (2013) cita que no período diurno há maiores valores de temperatura, em virtude da intensidade de raios solares, o que reduz no período noturno, onde a temperatura é menor. Assim, durante o dia a camada de mistura pode atingir centenas de quilômetros, em virtude da expansão dos gases, em função da temperatura. O inverso ocorre no período noturno, onde a redução de temperatura faz com que a camada limite diminua, o que reduz o volume e, consequentemente, a concentração dos poluentes na Camada Limite Noturna (CLN).

Tal fenômeno ocorre na camada da troposfera mais baixa, chamada de Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA). A CLP é formada basicamente por: camada de mistura ou camada limite convectiva (CLC), a camada residual (CR) e a camada limite estável ou noturna (CLN) (ALVIM, 2013; SILVA, 2014; ANDRADES, 2016) (Figura 27).

Figura 27 – Ciclo da Camada Limite Planetária ao longo do dia.



Fonte: STULL (1991) *apud* SILVA (2014).

5.4 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO CLIMÁTICA DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

A aplicação da metodologia de Ellis (2013) possibilitou obter resultados de variação de temperatura ao longo dos cenários. Estes resultados comprovam que os incrementos em relação ao modal ferroviário trariam benefícios para o clima regional, do país e do mundo. Mesmo que os valores sejam na ordem de de 10^{-5} a 10^{-9} decimais é importante destacar os prejuízos que as variações de temperatura acarretam.

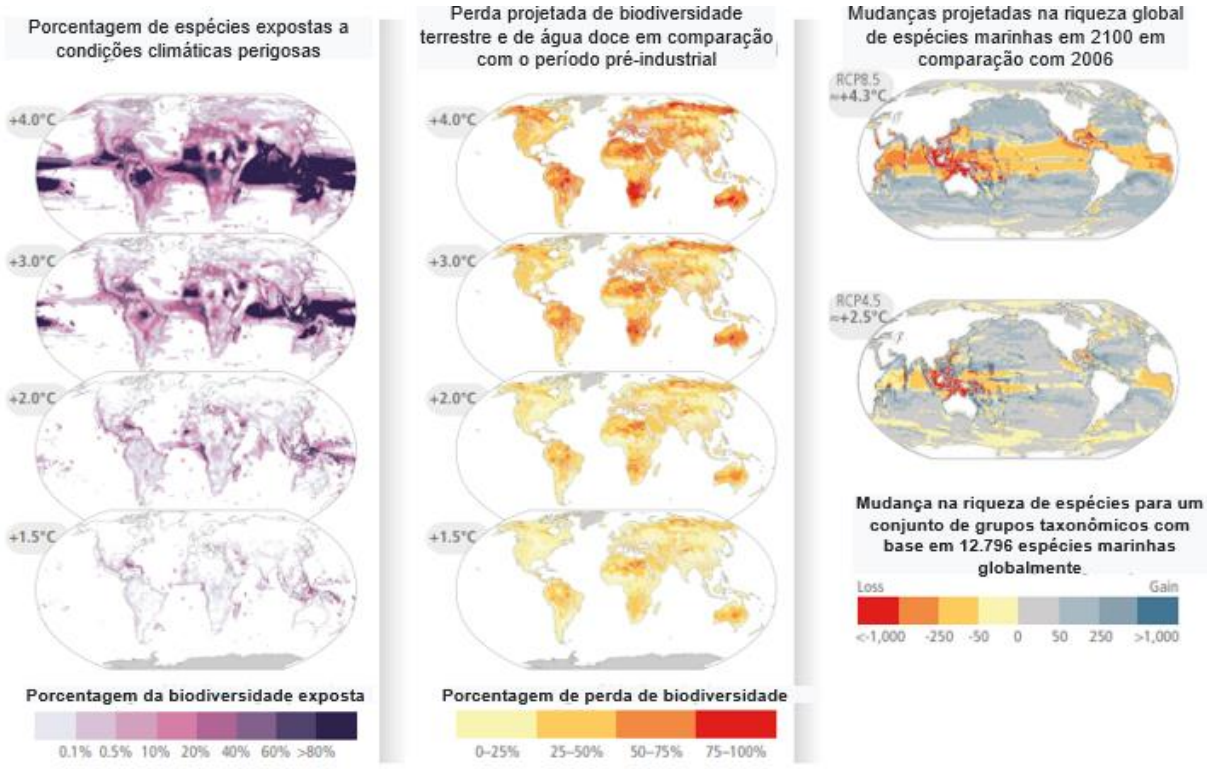
Schvambach (2022) analisou o “Efeito da implantação do plano de mobilidade urbana do município de Brusque/SC na emissão de gases de efeito estufa”. Utilizando o método de Ellis (2013) a autora demonstra que com a aplicação dos cenários de mobilidade implantados no município, haveria uma variação de temperatura de -0,92ºC.

Diversos estudos como os de Mikhaylov *et al*. (2019), Khan (2012), Blank (2015), IPCC (2021), apontam que os impactos em um pequeno aumento de temperatura são muitos. Um deles é o derretimento das calotas polares, causando o aumento do nível do mar. Assim, as áreas costeiras ficariam submersas, ameaçando

a agricultura, pastagem, fontes de água doce e a vida local, havendo a necessidade de deslocamento de assentamentos urbanos.

Além do mais, com o impacto em seus habitats naturais diversas espécies de plantas e animais começam a desaparecer, devido a necessidade de readaptação de muitas delas. O último Relatório do IPCC, divulgado no ano de 2022, traz simulações com diferentes incrementos de temperatura (+1,5ºC; +2,0ºC; +3,0ºC; e +4,0ºC) e suas consequências na biodiversidade (Figura 28). O estudo afirma que as alterações climáticas, em decorrência do aumento de temperatura desencadeiam a perda de especeis locais, aumento de doenças, mortalidade de plantas e animais, reestruturação do ecossistema e declínio de serviços ecossistêmicos.

Figura 28 – simulações com diferentes incrementos de temperatura (+1,5ºC; +2,0ºC; +3,0ºC; e +4,0ºC) e suas consequências na biodiversidade.



Fonte: adaptado de IPCC, 2022.

O aumento da temperatura oceânica também possui influência na maior incidência de eventos como furacões e tornados, em virtude da maior absorção de energia transmitida pelos oceanos. Consequentemente, haverá maiores índices de evaporação, também alterando o regime de chuvas extremas em diversas regiões,

causando deslizamentos e enchentes, por exemplo (COSTA, 2023; EPA, 2022; NOAA, 2021; WHO, 2021; PBMC, 2016).

De modo a restringir o aumento de temperatura em 1,5ºC e suas consequências, o Relatório do IPCC de 2022 apontou algumas medidas que precisam ser adotadas. Dentre elas podem ser citadas: expansão do uso de energia limpa, investimentos em descarbonização na indústria, incentivo às construções verdes, replanejamento das cidades, transição dos meios de transporte para netzero ou baixa emissão, conservação dos ecossistemas naturais e melhorias nos sistemas alimentares existentes.

Diante do exposto, o presente estudo demonstra que está em linha com as medidas apontadas pelo IPCC (2022). Tal fato se dá em virtude das taxas de redução de CO_2 nos cenários propostos, o que acarreta em reduções de aumentos de temperatura, bem como dos impactos provocados por estas.

6 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)

6.1 PRODUTO 1 – INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O inventário demissões referente a rota de cargas portuárias, para os modais rodoviário e ferroviário, foi realizado utilizando duas diferentes metodologias, sendo elas: ferramenta GHG Protocol e simulação utilizando o WRF-Chem. Com a ferramenta GHG Protocol, foi possível quantificar as emissões de CO_{2eq} com dados de movimentação de carga para os portos referente ao ano de 2020. Já a simulação utilizando o modelo WRF-Chem permitiu avaliar a emissão e concentração de dióxido de carbono ao longo do Estado de Santa Catarina (Figura 29 e Figura 30).

Figura 29 - Emissão de CO_2 em Santa Catarina, no dia 23 de novembro de 2020.

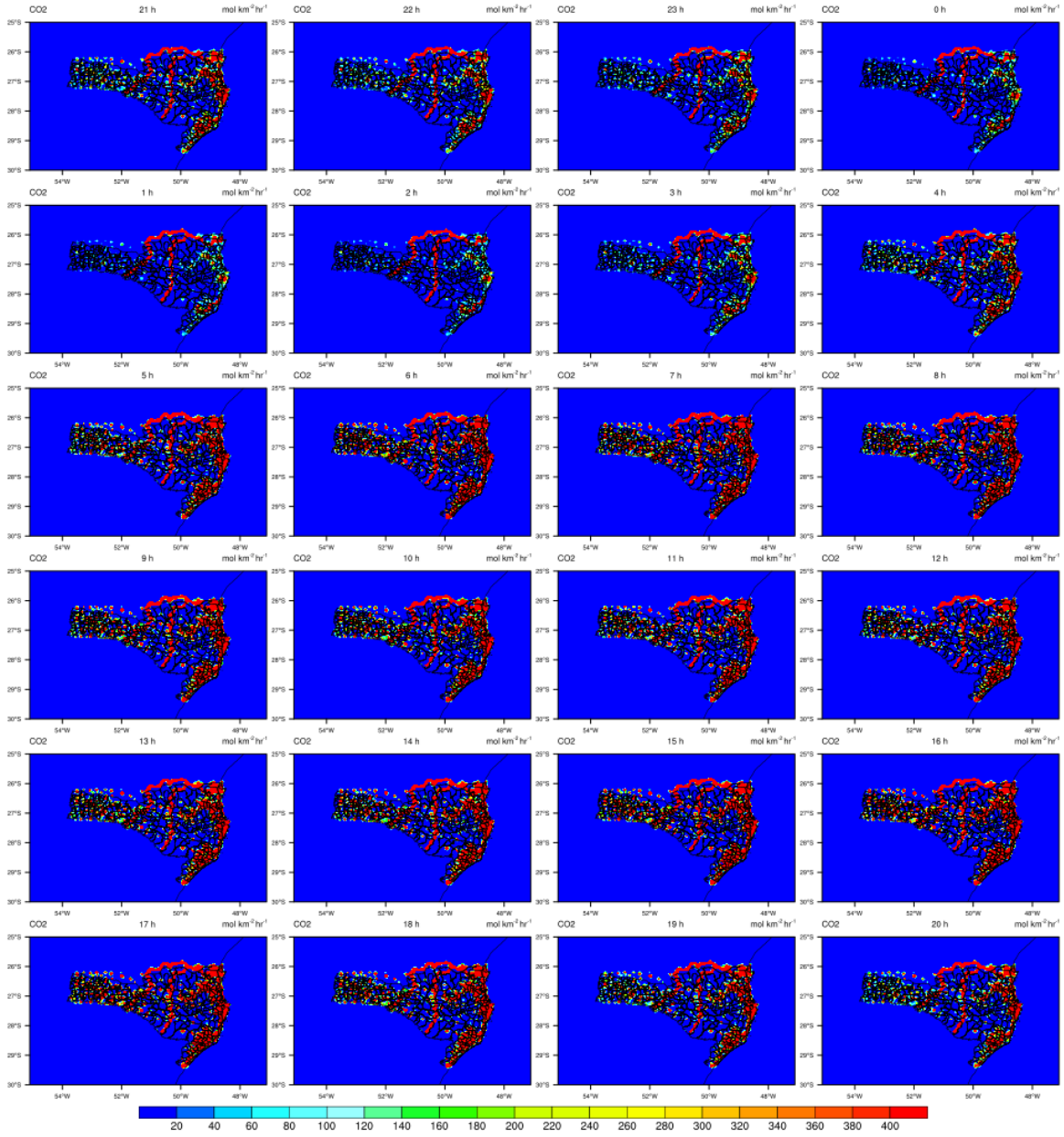
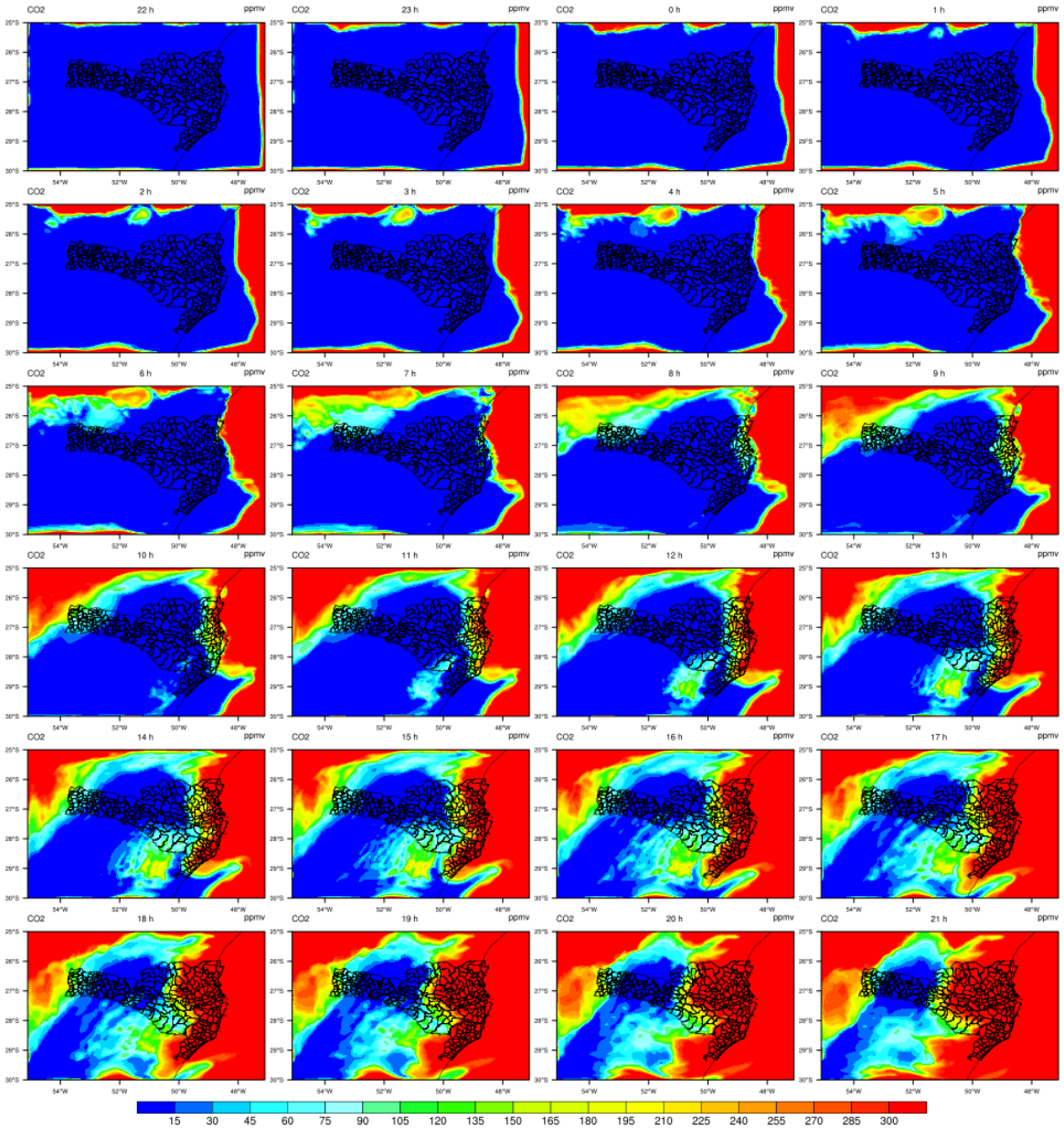


Figura 30 - Concentração de CO_2 ao longo do Estado de Santa Catarina.



6.2 PRODUTO 2- ARTIGO SUBMETIDO

O presente estudo possibilitou a elaboração de um artigo intitulado de “Impactos da Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Sistema Modal na Rota de Cargas Portuárias de Santa Catarina”. O mesmo foi submetido à revista Ciência e Natura (ISSN 2179-460X), na categoria geociências. A citação da publicação segue abaixo:

Lamim, Gabriela et al. Impactos da Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Sistema Modal na Rota de Cargas Portuárias de Santa Catarina. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 44, 2022. DOI: https://doi.org/10.5902/2179460xxxxxx.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo utilizou a ferramenta GHG Protocol, para a estimativa de emissão de GEE, e o modelo WRF-Chem para avaliar a emissão e a dispersão destes nas rotas de cargas portuárias de Santa Catarina. Os dados de movimentação por tipo de carga, presentes no banco de dados da ANTAQ, foram essenciais para os cálculos das emissões.

Os resultados, utilizando a ferramenta GHG Protocol, mostram que o modal ferroviário apresenta menores emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) quando comparado com o modal rodoviário. O modal ferroviário apresentou uma emissão de 118.781,67 tCO_{2e} e o modal rodoviário apresentou 337.349,06 tCO_{2e}, considerando o cenário 5, onde estimou-se que ambos os modais teriam a mesma representatividade. Isso se dá em virtude da capacidade de carga das locomotivas, onde é possível percorrer a mesma distância transportando mais material, viabilizando o tempo de transporte logístico, bem como reduzindo o impacto de emissão de CO_{2e}.

A proposição de cenários demonstrou a importância de investir na diversificação da utilização dos modais de transporte no Estado de Santa Catarina, utilizando como base os modais ferroviários e rodoviários apenas. Fato é que os resultados demonstram reduções significativas de até 36% nas emissões totais no cenário 5, o que corresponde a uma diminuição de 165.674,19 toneladas de CO_{2e} em relação ao cenário atual.

A partir da comparação dos dados de emissão com os de produtividade catarinense permitiu analisar que o setor alimentar foi o que apresentou maior representatividade em todos os cenários, com emissão de 217.009,92 tCO_{2e} no cenário atual. Posteriormente, merecem destaque o setor de máquinas, aparelhos e materiais elétricos com 60.315,08 tCO_{2e}, de máquinas e equipamentos com 58.449,66 tCO_{2e} e de madeira com 3.264.078,89 tCO_{2e}.

Já, com a utilização do modelo WRF-Chem, foi possível realizar o inventário de GEE, onde observou-se a emissão e a dispersão da concentração de CO_2 ao longo do Estado, para o cenário atual. Diante das situações consideradas para a entrada do modelo foi observado que, a região litorânea e oeste apresentaram destaque nas emissões, em virtude do perfil econômico

destas e pela localização dos portos. As rodovias federais foram as que apresentaram maiores emissões de CO_2, por serem rotas estratégicas de escoamento de produção. As ferrovias atuais apresentaram constate emissão por ter o tráfego de trens constante nos dados de entrada do modelo.

Os resultados da estimativa da variação climática dos cenários propostos apontaram que, no caso de implantação do cenário 5, a redução de temperatura mundial seria de aproximadamente -0,000012 ºC. Este valor, se torna expressivo quando somadas com diversas outras possibilidades de ações mundiais para diminuir o aquecimento global, e limitá-lo a 1,5º até 2030 conforme indicado pelo IPCC.

As ações de combate a mudanças climáticas são urgentes e devem ganhar um olhar importante nas tomadas de decisões. Diversas adaptações são necessárias em nível regional que considerem a interconexão entre as ações locais e seus impactos globais, de modo a evitar o aumento dos impactos à sociedade, economia e meio ambiente.

Assim, é de suma importância que assuntos como esse sejam aprofundados por parte do Estado de Santa Catarina de modo a atender a pulverizada e importante economia. A definição de estratégias políticas e planos de abatimento/ mitigação das emissões de Gases de Efeito estufa para o sistema de transporte de cargas aos portos são, portanto, de extrema relevância. As medidas não apenas reduziram as emissões de GEE, mas também podem resultar no melhor aproveitamento energético para o setor de transportes.

Por fim, com esse trabalho, foi possível evidenciar que ainda há poucos estudos no Estado de Santa Catarina, que abordam a emissão de GEE e a realização de inventários contínuos e completos no Estado traria um panorama geral para priorização das ações.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Possibilidade de incremento de outros GEE, como CH_4, por exemplo, bem como de imagens de dispersão da concentração ao longo do dia.
2. Inclusão dos horários de tráfego de trens ao longo do percurso para avaliar as diferenças entre as ferrovias já existentes.
3. Simulação considerando os dados dos diferentes cenários, como forma de avaliar o comportamento das emissões com o incremento de maior utilização do modal ferroviário.

REFERÊNCIAS

ABDUL-RAZZAK, Hayder; GHAN, Steven J. Parameterization of aerosol activation 2. Multiple aerosol types. **Journal of geophysical research**, v. 105, n. D5, p. 6837-6844, 2000.

ABREU, Mônica Cavalcanti Sáde; ALBUQUERQUE, Aline Mota; FREITAS, Ana Rita Pinheiro de. Posicionamento estratégico em resposta às restrições regulatórias de emissões de gases do efeito estufa. **Revista de Administração,** v. 49, n.3, p.578-590, 2014.

ÁGUABRASIL. **As Mudanças Climáticas**: riscos e oportunidades. São Paulo: Banco do Brasil/ WWF Brasil, 2015.130 p.

AHMADOV, R. *et al*. A volatility basis set model for summertime secondary organic aerosols over the eastern United States in 2006. **Journal of geophysical research**, v.117, p.1-19 , 2012.

ALVIM, Débora Souza. **Estudo dos Principais Precursores de Ozônio na Região Metropolitana de São Paulo**. 2013. 179 f. Tese (Doutorado) – Curso de Tecnolgia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ANDRADE, M.F. *et al*. Air quality forecasting system for southeastern Brazil. **Frontiers in environmental Science**, v.3, p. 1-14., 2015.

ANDRADES, Maicon Fonseca. **Análise dinâmica de um modelo determinístico para a descrição do comportamento da camada limite atmosférica noturna**. 2014. 49 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **1º inventário nacional de emissões atmosféricas do transporte ferroviário de cargas**. Relatório final, 2011. 54 p.

_____. **Concessões ferroviárias**. Disponível em:< https://antt-hml.antt.gov.br/web/guest/concessoes-ferroviarias >. Acesso em:04 abr.2023.

_____. **Anuário do Setor Ferroviário**. 2022. Disponível em:< https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel>. Acessado em: 21 abr. 2023.

ARBUÉS, Pelayo; BAÑOS, José; MAYOR, Matías. The spatial productivity of transportation infrastructure. **Transportation Research Part A: Policy and Practice,** v. 75, n. C, p.166-177, 2015.

AQUINO, Jéssica Gabrielle Pereira de. **Dimensões, características e desafios das cadeias agropecuárias do estado de Santa Catarina**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BCSD Portugal; WBCSD; WRI. **Protocolo de Gases com Efeito Estufa** – Normas Corporativas de Transparência e Contabilização. 2008. Disponível em:< https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/2008/10/27/protocolo-de-gases-com-efeito-estufa-normas-corporativas-de-transparencia-e-contabilizacao/>. Acessado em: 16 fev. 2023.

BLANK, Dionis Mauri Penning. O contexto das mudanças climáticas e as suas vítimas. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 157-172, 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 13% a partir de hoje (1/3).** 2021. Disponível em:< https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3>. Acessado em: 25 jun. 2022.

CABRAL, Julio. **Iveco Stralis NR investe no conforto**. 2010. Disponível em:< https://www.vrum.com.br/noticias/iveco-stralis-nr-investe-no-conforto/>. Acessado em: 25 jun. 2022.

CANAL DANA. **R 540 da Scania leva o Green Truck 2020 por baixo consumo de combustível.** 2020. Disponível em:<https://dana.com.br/canaldana/2020/09/29/r-540-da-scania-leva-o-green-truck-2020-por-baixo-consumo-de-combustivel/>. Acessado em: 25 jun. 2022.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Urbano. In: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Boletim regional, urbano e ambiental**. Brasília: Dirur, 2011. p. 123-139.

CASSANE, Mauro. **Igualdade só na aparência.** 2020. Disponível em:< https://ocarreteiro.com.br/artigos-revistas/igualdade-so-na-aparencia/>. Acessado em: 25 jun. 2022.

CONTI, Ludmilla Manera. **Modelagem da dispersão de poluentes na Mesorregião do Vale do Paraíba durante a greve nacional dos caminhoneiros em 2018**. 2020. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 2020.

CORREA, Vivian Helena Capacle; RAMOS, Pedro. A Precariedade do Transporte Rodoviário Brasileiro para o Escoamento da Produção de Soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. **Resr**, Piracicaba, v. 48, n. 2, p. 447-472, 2010.

COSTA, Maria Luiza Giordano da. **Mudanças climáticas e impactos ambientais**. 2023. 82 F. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2023.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Painel do transporte**: rodoviário. Disponível em:< https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte-rodoviario >. Acessado em: 07 de maio de 2022.

DULAC, Vinicius Ferreira Dulac; GODOY, João Vicente Zancan; KOBIYAMA, Masato. Utilização de dados de luzes noturnas para avaliação Espaço-temporal de inundação. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico, 22, 2017, Florianópolis. **Anais [...].**

Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.

DETRAN. **Veículos em circulação em Santa Catarina, por tipo**. Disponível em:< https://www.detran.sc.gov.br/transparencia/estatisticas/veiculos-2/>. Acessado em: 18 mar.2023.

ELLIS, Robert. **Equation for Global Warning**: Derivation and Application. 2013. Disponível em: <https://www.worldstormcentral.co/globalwarmingeqn/globalwarmingeqn.html >. Acessado em: 18 nov. 2022.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Sources of Greenhouse Gas Emissions**. Disponível em:< https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#:~:text=The%20largest%20source%20of%20greenhouse,Greenhouse%20Gas%20Emissions%20and%20Sinks.>. Acessado em: 14 set. 2022.

_____. **Impacts of Climate Change**. 2022. Disponível em:< https://www.epa.gov/climatechange-science/impacts-climate-change >. Acessado em: 21 abr. 2023.

FAN, Yee Van *et al*. A review on air emissions assessment: Transportation. **Journal of Cleaner Production,** v.194, p. 673–684, 2014.

FETRANCESC - FEDERAÇÃO DE EMPRESAS DE TRANSPORTE DE CARGA E LOGÍSTICA NO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Dados Fetrancesc**. Disponível em:< https://fetrancesc.com.br/dados-fetrancesc/ >. Acessado em: 19 ago. 2023.

FIESC - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Santa Catarina em Dados**. Florianópolis: FIESC, 2015. 196 p.

_____. **Santa Catarina em Dados**. Florianópolis: FIESC, 2017. 240 p.

_____. **Proposta para inserção de Santa Catarina no contexto Logístico Nacional**. Florianópolis: FIESC, 2019. 104 p.

_____. **Agenda Portos Catarinenses 2021**. Disponível em:< https://fiesc.com.br/sites/default/files/publications/Agenda%20Portos%20Catarinenses%202021.pdf>. Acessado em: 31 mai. 2022.

_____. **Portos Catarinenses**. Disponível em:< https://www2.fiescnet.com.br/web/uploads/recursos/d1371e2e49727d47275939346d4abb08.pdf>. Acessado em: 13 mai. 2022.

_____. **Agenda estratégica**: infraestrutura de transporte e a logística catarinense. Florianópolis: FIESC, 2022. 156 p.

_____. Atlas da competitividade da indústria catarinense 2022. Florianópolis: IEL/SC, 2022. 242p.

FONSECA, Kenny Tanizaki. **Emissões de Gases de efeito estufa pela frota veicular da Universidade Federal Fluminense**. Disponível em: < https://www.uff.br/sites/default/files/paginas-internas-orgaos/calculo_de_emissoes_da_uff_0.pdf>. Acessado em: 02 fev. 2023.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al*. Global Carbon Budget 2022. **Earth System Science Data**, v.14, n. 11, p.4811–4900, 2022.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de gases do efeito estufa**. São Paulo: FGV, 2009. 22 p.

_____. **Classificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1 nas respectivas categorias de fontes de emissão – versão 1.0**. 2016. Disponível em: < https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace;/bitstream/handle/10438/18615/GVces_Nota%20t%c3%a9cnica_classifica%c3%a7%c3%a3o%20das%20emiss%c3%b5es%20de%

20gases%20de%20efeito%20estufa%20%28GEE%29%20de%20Escopo%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 15 abr. 2023.

GUENTHER, A. *et al*. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). **Atmos. Chem. Phys**., v.6, p. 3181–3210, 2006.

GUIA MARÍTIMO. **Tipos de Containers**. Disponível em: < https://www.guiamaritimo.com.br/utilidades/tipos-containers>. Acessado em: 14 set. 2022.

HONG, S.Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. **Monthly Weather Review**, n.134, 2318-2341, 2006.

IACONO, M.J. *et al*. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres,** v.113, p.1-8, 2008.

IEMA - INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários:** Relatório Final. Brasília: MMA, 2011. 114 p.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEREOLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos.** Disponível em:< https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acessado em:8 mai. 2023.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>. Acessado em: 09 jan. 2022.

IRIART, Paulo Geovani; FISCH, Gilberto. Uso do Modelo WRF-CHEM para a Simulação da Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p.610-625, 2016.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Mudança do clima no Brasil**: aspectos econômicos, sociais e regulatórios. Brasília: Ipea, 2011. 440 p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Aquecimento Global de 1,5°C**: Sumário para Formuladores de Políticas. Brasília: MCTIC, 2018. 28 p.

_____. **Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas.** Brasília: MCTIC, 2019. 28 p.

_____. **Mudança do Clima 2021** - A Base Científica: Sumário para Formuladores de Políticas. 2021. 38 p.

_____. Technical Summary. In: **Climate Change 2022**: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge,UK and New York, NY, USA, 2022. pp. 37–118.

JIMÉNEZ, P. A *et al.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation, Mon. **Weather Rev**., v.140, p. 898–918, 2012.

JUNGES, Alexandre Luis *et al*. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, v.13, n.5, p. 126-151, 2018.

KHAN, Zulfequar Ahmad. Climate Change: Cause & Effect. **Journal of Environment and Earth Science**, v.2, n.4, p.48-53, 2012.

KOVÁCS, Attila *et al*. Coupling traffic originated urban air pollution estimation with an atmospheric chemistry model. **Urban Climate**, v.37, p.1-10, 2021.

LE TREUT, H. *et al*. Historical Overview of Climate Change Science. In: SOLOMON, S et al. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the**

Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007. Cap. 1. p. 94-127.

LOGWEB. **Tecnologia de locomotivas aumenta produtividade na Operação Sul da Rumo**. 2018. Disponível em: https://www.logweb.com.br/tecnologia-de-locomotivas-aumenta-produtividade-na-operacao-sul-da-rumo/. Acessado em: 14 set. 2022.

LUIZ, Bruno Vieira. **Análise de emissão de gases de efeito estufa dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis a partir da proposição de cenários de valorização de resíduos**. 2022. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Clima e Ambiente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

LUNA, Mônica Maria Mendes *et al*. **Plano Estadual de Logística e Transporte de Santa Catarina**. Florianópolis: Governo de Santa Catarina, 2013. 153 p.

LLX; ECOLOGUS. **Estudo da Modelagem da Dispersão de Poluentes Atmosféricos para Análise dos Impactos Atmosféricos do Distrito Industrial de São João da Barra e Corredor Logístico**. Apêndice A3, 2011.

MAFALDO, Caroline do Rosario. **Portos catarinenses**: um diagnóstico e perspectivas dos terminais privados. 2020. 26 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciência e Tecnologia, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

MADRONICH, S. Photodissociation in the atmosphere: 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds, J. Geophys. **Res.-Atmos**., v.92, p. 9740–9752, 1987.

MARCILIO, Geísa Pereira; RANGEL, João José de Assis; PEIXOTO, Túlio Almeida. Análise de emissões de gases do efeito estufa em um sistema de transporte de carga. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 17, n. 2, p. 533-566, 2017.

MATTEI, Taíse Fátima; CUNHA, Marina Silva da. Emissão de gases do efeito estufa no Brasil: análise de curto e longo prazo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 14, n. 4, p. 953-967, 2021.

MATTOS, Laura Bedeschi Rego de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa - o caso do município do rio de janeiro**. 2001. 222 f. Tese (Doutorado) – Curso de ciências em planejamento energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MERCEDES BENZ. **Ficha técnica**. 2019. Disponível em:< https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/onibus/onibus-urbano/dados-tecnicos/2021/O500_M_1826_59.pdf>. Acessado em: 25 jun. 2022.

MERSKY, Avi; LANGER, Therese. **Achieving freight transport GHG emissions reductions through emerging Technologies**. Washington: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2021.

MIKHAYLOV, Alexey *et al.* Global climate change and greenhouse effect. **Entrepreneurship and sustainability**, v.7, n.4, p. 2897 – 2913, 2020.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. 2011. 114 p.

MOHAMMED, Safwan *et al*. An overview of greenhouse gases emissions in Hungary. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 1-12, 2021.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of Oneand Two-Moment Schemes. **Monthly Weather Review**, 137, 991-1007, 2007.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Climate change impacts**. 2021. Disponível em:< https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/climate-change-impacts >. Acessado em: 31 abr. 2023.

NOBRE, Carlos A.; REID, Julia; VEIGA, Ana Paula Soares. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

NSC. **Velocidade média de caminhões na BR-470 é de 29 km/h e viagem demora triplo do tempo**. Disponível em https://www.nsctotal.com.br/colunistas/renato-igor/velocidade-media-de-caminhoes-na-br-470-e-de-29-kmh-e-viagem-demora-triplo. Acessado em: 14 set. 2022.

NUNES, Lidiane Silva do Espírito Santo. **Avaliação do impacto de emissões de fontes de poluentes atmoséricos sobre a qualidade do ar**: estudo de caso no porto de Suape-PE. 2017. 180 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Quimica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

OERTEL, Cornelius *et al.* Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Chemie der Erde**, v.76, p. 327–352, 2016.

PAPIEZ, M. R. *et al*. The impacts of reactive terpene emissions from plants on air quality in Las Vegas, Nevada, Atmos. **Environ**, 43, 4109–4123, 2009.

PARK, Soonchan. Quality of transport infrastructure and logistics as source of comparative advantage. **Transport Policy**, v.99, p.54–62, 2020.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas:** Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE – UFRJ: Rio de Janeiro, 2016. 184 p.

RAFEE, Sameh A. Abou *et al*. Contributions of mobile, stationary and biogenic sources to air pollution in the Amazon rainforest: a numerical study with the WRF-Chem model. **Atmos. Chem. Phys**., v.17, p.7977–7995, 2017.

SANCHES, Vinicius dos Santos. Locomotiva GE ES43BBi. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: < Cassio Aurelio Suski > em: 25 fev. 2022.

SCHEELBEEK, Pauline F D *et al*. The effects on public health of climate change adaptation responses: a systematic review of evidence from low- and middle-income countries. **Environ. Res. Lett**, v.16, p.1-14, 2021.

SCHVAMBACH, Amabilly. **Efeito da implantação do plano de mobilidade urbana do município de Brusque/SC na emissão de gases de efeito estufa**. 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Clima e Ambiente, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SCPAR. **Porto de São Francisco do Sul - Trens respondem por 50% da carga de grãos**. 2021. Disponível em: < https://portosaofrancisco.com.br/saiba-mais/id/131>. Acessado em: 14 set. 2022.

SECRETARIA DA FAZENDA. **Com rodovias bloqueadas, prejuízo diário no setor de suínos e aves de SC**. Disponível em: < https://www.sef.sc.gov.br/midia/noticia/3232/Com_rodovias_bloqueadas,_preju%C3%ADzo_di%C3%A1rio_no_setor_de_su%C3%ADnos_e_aves_de_SC>. Acessado em: 21 mar. 2022.

SEEG - SYSTEM GAS EMISSIONS ESTIMATION. **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. 2021. 55 p.

SKAMAROCK, William C. *et al.* **A description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4681STR, p. 88, 2008.

SILVA, Adriano Ferreira. **Características espectrais e similaridade na Camada limite superficial sobre floresta manejada: flona tapajós km 83**. 2014. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2014.

SILVA, P. B *et al*. Potencial de redução de emissão de CO2 pelo uso de transporte ferroviário: um estudo de caso no Brasil. **RIPE**, Brasília, v. 6, n. 1-17, 2020.

SOUZA, Cristiane Duarte Ribeiro de et al. Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. **Energy Policy**, v.53, p.125-135, 2013.

STEPHENS, Graeme L.; ELLIS, Todd D. Controls of Global-Mean Precipitation Increases in Global Warming GCM Experiments. **Journal of Climate**, v.21, n.23, p. 6141–6155, 2008.

UFSC. **Emissões veiculares no estado de Santa Catarina - ano base 2017**. Florianópolis: LCQAR, 2020.

UNESC. **O passado e o futuro das ferrovias catarinenses**. Disponível em:< https://www.unesc.net/portal/blog/ver/656/39282>. Acessado em: 28 jan. 2023.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Greenhouse Gases Factsheet**. 2022. Disponível em:< https://css.umich.edu/publications/factsheets/climate-change/greenhouse-gases-factsheet>. Acessado em: 06 fev. 2023.

VASQUES, Thiago Vieira. **Inventário de emissões veiculares no estado de Santa Catarina.** 2018. 78 f. Monografia (Graduação) – Curso Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

WANG, Shiying; GE, Mengpin. **Transporte é a fonte de emissões que mais cresce**. In: WRIBRASIL, 2019. Disponível em: https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/10/transporte-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-entenda-em-cinco-graficos#:~:text=As%20emiss%C3%B5es%20de%20transporte%20%E2%80%93%20que,globais%20de%20CO2%20em%202016.. Acesso em: 31 maio 2022.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Climate change and health**. 2021. Disponível em:< https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health >. Acessado em: 21 abr. 2023.

YANG, Le *et al*. Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. **Acta Ecologica Sinica**, v. 34, n. 4, p. 204-212, 2014.

ZUNIGA, Abraham Damian Giraldo *et al*. Revisão: propriedades físico-químicas do biodiesel. **Pesticidas: r. ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 21, p. 55-72, 2011.