

**ANÁLISE DO IMPACTO DA VARIAÇÃO HIDROLÓGICA NO CICLO DE  
VIDA DO TRANSPORTE POR HIDROVIA DE INTERIOR: O CASO DO RIO  
MADEIRA**

Breno Tostes De Gomes Garcia

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2025

**ANÁLISE DO IMPACTO DA VARIAÇÃO HIDROLÓGICA NO CICLO DE  
VIDA DO TRANSPORTE POR HIDROVIA DE INTERIOR: O CASO DO RIO  
MADEIRA**

Breno Tostes de Gomes Garcia

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D. Sc.

---

Prof. Hostilio Xavier Ratton Neto, Dr.

---

Prof. José Carlos Cesar Amorim, D. SC.

---

Prof. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, D. SC.

---

Prof. Ilton Curty Leal Junior, D. SC.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2025

Garcia, Breno Tostes de Gomes

**Análise do Impacto da Variação Hidrológica no  
Ciclo de Vida do Transporte por Hidrovia de Interior:  
O Caso do Rio Madeira / Breno Tostes de Gomes Garcia.**  
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XIII, 184 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia de Transportes, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 124-131.

1. Transporte de Barcaças. 2. Variação Hidrológica.  
3. Análise de Ciclo de Vida (ACV) II. I. Silva, Marcelino  
Aurélio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## DEDICATÓRIA

*Dedico ao meu cachorro, Zeca, cuja alegria genuína e fidelidade incondicional proporcionaram conforto nos momentos mais difíceis, trazendo leveza ao cotidiano e inspiração constante para prosseguir com determinação e esperança.*

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação só foi possível graças à um seleto grupo de pessoas que, de alguma forma, fizeram a diferença durante este período da minha vida. Afinal, este trabalho não foi um mero rito acadêmico. Mas, sim, o resultado de todo o esforço e sistemática dedicação empreendida durante todo este tempo.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças e tranquilidade para conseguir superar os diversos obstáculos – e não foram poucos – que surgiram ao longo deste tempo, necessários para o meu amadurecimento pessoal.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, pela orientação rigorosa, incentivo constante e valiosos conselhos que permitiram meu crescimento intelectual e científico ao longo desta jornada acadêmica, que se iniciou no mestrado e se encerra no doutorado.

Aos membros da banca examinadora, Professor Hostilio Xavier Rattón Neto, Professor José Carlos Cesar Amorim, Professor Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, colega de doutorado que tive a honra de tê-lo na banca examinadora, e o Professor Ilton Curtis Jr., agradeço por fazerem parte dessa jornada, as sugestões e críticas contribuíram para o aprimoramento desta tese de doutorado.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ), pela infraestrutura, apoio institucional e ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a Jane por todo o suporte administrativo ao longo dessa jornada.

Registro minha indignação com a falta de incentivos à pesquisa e ensino, condição que se perpetua por décadas, passando de governo em governo, e nada muda. Contudo, apesar de escassos, foram com esses recursos que me permitiram concluir essa pesquisa. A Portaria nº 206, de 4 de setembro de 2018, me obriga a agradecer com essas palavras – "O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001". Contudo, foi com a bolsa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CPNq) que permitiu continuar, e com muita dificuldade, com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas pesquisadores, cujas trocas de experiências e debates acadêmicos enriqueceram significativamente minha formação, dedico minha sincera apreciação: Claudeny Santana, Thayse Ferrari, Marcus Camara, Tálita Floriano, Camilla Souza,

Filipe Ribeiro, Igor Godeiro, André Brandão, Juliane Bender e tantos outros que estiveram presentes. Sou grato pelos momentos que passamos juntos.

Aos amigos que adquiri nesta jornada, Bruno Guida, Marina Donato, Marcos Cardoso e Alexandre Medeiros, o suporte nos momentos difíceis foram muito importantes para mim.

Minha especial gratidão ao Alexandre Medeiros por me ajudar no desenvolvimento desta tese e ter sido um amigo quando achei que não fosse conseguir. Seu apoio foi essencial nesta jornada, meus sinceros agradecimentos.

Igualmente importantes foram os amigos que adquiri no IVIG, presentes no cotidiano de trabalho e na minha vida pessoal, Ao Rodrigo Bellezoni, Clarice, Thales, Pedro, Betina, Conrado (*in memory*), dentre tantos outros, meu muito obrigado.

Não é possível deixar de agradecer, de forma especial, ao Mário Moraes, um grande amigo que adquiri no IVIG. Sempre me incentivou a concluir o doutorado, a continuar sempre se aprimorando. A convivência, as conversas que tivemos, uma verdadeira transmissão de muito conhecimento, acompanhada de experiência de vida acumulada, foram essenciais para minha formação profissional e, principalmente, pessoal. Meu muito obrigado!

Ao meu amigo de infância, Luiz Antônio (Lula) pelo apoio durante esse tempo todo.

À minha família, minha mãe, Maria Angélica, meu pai, Paulo Márcio, madrasta, Rute, irmãos, Lucas, Liana e Ana Vitória, e sogro e sogra, Sr. Paulo e D. Regina, pelo incentivo a perseguir meus sonhos.

Sou muito grato às minhas avó e tia avó, Alice, Ivone e tia Aninha, por estarem sempre do meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida, não me permitiram esmorecer diante das dificuldades.

À minha namorada, agradeço imensamente por seu companheirismo, compreensão e incentivo incondicional durante todo esse período. Seu apoio constante e paciência foram fundamentais para superar os desafios desta jornada.

À minha psicóloga, Jaqueline, por todo suporte e apoio. Foram de suma importância.

Faltam palavras no dicionário para denotar tamanha gratidão que tenho pela Vania Sanches, onde me sinto até hoje acolhido como um filho teu. Neste período, as muitas horas de conversas e sabedoria transmitida, que carregarei para o resto da minha vida,

foram essenciais nos momentos em que as decisões mais difíceis foram tomadas, sem sombra de dúvida da melhor forma possível.

Aos meus colegas da SETRAM, agradeço profundamente pela colaboração diária, pelas inúmeras trocas de conhecimento e pelo espírito de parceria e amizade que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal durante este período; Washinton Reis, Rogério Sacchi, Rodrigo Mattos, Caio Duarte, Luiz Penner e equipe, Fabiana Silva, Douglas (Douglitos) Haddad, Anderson Reis, Fernando Azevedo, Rafaella Ponce (Raffita), Clarissa Coutinho (Clarinha), Priscila Castro (Pri), Jéssica Coelho, Renato Simões (Renatito), Alter Moraes (Altin), Amanda Dias, Diana Lopes, Lian Frota, Eduardo Verano (Edu), Vera Lombardy (Verinha), Marcelo Alvim, , Juliana, Isadora, Zeni, dentre tantos outros, meu muito obrigado.

A todos que contribuíram, meu mais sincero obrigado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

**ANÁLISE DO IMPACTO DA VARIAÇÃO HIDROLÓGICA NO CICLO DE VIDA DO TRANSPORTE POR HIDROVIA DE INTERIOR: O CASO DO RIO MADEIRA**

Breno Tostes de Gomes Garcia

Fevereiro/2025

Orientador: Dr. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

Esta tese tem o objetivo de investigar o impacto da variação hidrológica no ciclo de vida do transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira, utilizando o método de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Com as mudanças climáticas intensificando eventos hidrológicos extremos, o modo hidroviário enfrenta desafios como a redução de capacidade de carregamento e o aumento dos impactos ambientais. A pesquisa analisou o impacto ambiental do transporte de grãos em cenários com diferentes condições hidrológica e logística.

Os resultados indicaram que as emissões de  $CO_{2Eq}$  são maiores na seca em razão do aumento do consumo de combustível e da redução da capacidade de carregamento deste modo de transporte. Os comboios de barcaças de elevada capacidade de carregamento, utilizados na cheia, apresentaram menor impacto ambiental que os comboios de barcaças utilizados na seca.

Os achados destacam a importância de integrar condições hidrológicas às análises ambientais do modo hidroviário e apontam para a necessidade de investimentos em infraestrutura e em tecnologias de propulsão que permitam a migração para fontes energéticas menos nocivas ao meio ambiente. A pesquisa oferece contribuições significativas para o planejamento sustentável do transporte de grãos no Brasil, propondo estratégias de mitigação dos impactos ambientais no contexto das mudanças climáticas.



Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF THE IMPACT OF HYDROLOGICAL VARIATION ON THE  
LIFE CYCLE OF INLAND WATERWAY TRANSPORT: THE CASE OF THE  
MADEIRA RIVER

Breno Tostes de Gomes Garcia

February/2025

Advisor: Dr. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Department: Transport Engineering

This thesis aims to investigate the impact of hydrological variation on the life cycle of grain transportation via the Madeira River waterway, using the Life Cycle Assessment (LCA) method. With climate change intensifying extreme hydrological events, the waterway mode faces challenges such as reduced carrying capacity and increased environmental impacts. The research analyzed the environmental impact of grain transportation under scenarios with different hydrological and logistical conditions.

The results indicated that CO<sub>2</sub>-eq emissions are higher during the dry season due to increased fuel consumption and reduced carrying capacity of this mode of transportation. Barge convoys with higher carrying capacity, used during the flood season, showed lower environmental impact compared to barge convoys used during the dry season.

The findings highlight the importance of integrating hydrological conditions into environmental analyses of the waterway mode and emphasize the need for investments in infrastructure and propulsion technologies that enable a transition to less environmentally harmful energy sources. This research provides significant contributions to the sustainable planning of grain transportation in Brazil, proposing strategies to mitigate environmental impacts in the context of climate change.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	1
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA .....	3
1.3	JUSTIFICATIVA .....	4
1.4	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA E INEDITISMO DA TESE .....	6
1.5	PREMISSAS E HIPÓTESES .....	6
1.6	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	7
1.7	ESTRUTURA DA TESE .....	8
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV).....</b>	<b>10</b>
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO DO MÉTODO ACV .....	10
2.2	INTRODUÇÃO AO MÉTODO ACV .....	11
2.3	ESTRUTURA DO MÉTODO ACV .....	12
2.3.1	<i>Fase I: Definição de Objetivo e Escopo .....</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Fase II: Análise de Inventário .....</i>	<i>14</i>
2.3.3	<i>Fase III: Análise de Impacto.....</i>	<i>15</i>
2.3.4	<i>Fase IV: Interpretação.....</i>	<i>19</i>
2.4	MÉTODO ACV APLICADO EM SISTEMAS DE TRANSPORTES .....	19
2.5	ACV EM TRANSPORTE POR HIDROVIA DE INTERIOR .....	21
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	44
<b>3</b>	<b>DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO DA ACV.....</b>	<b>45</b>
3.1	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO DA ACV .....	45
3.2	DEFINIÇÃO DE ESCOPO DA ACV .....	45
3.2.1	<i>Fronteira do Sistema.....</i>	<i>45</i>
3.3	UNIDADE FUNCIONAL .....	50
3.4	COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DO RIO MADEIRA.....	51
3.4.1	<i>Ajustar Base de Dados.....</i>	<i>51</i>

<b>3.5</b>	<b>TRECHO CRÍTICO À NAVEGAÇÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>3.6</b>	<b>FORMAÇÃO DE COMBOIO DE BARCAÇAS .....</b>	<b>53</b>
<b>3.7</b>	<b>CENÁRIOS .....</b>	<b>55</b>
3.7.1	<i>Construção de Cenário-Base.....</i>	56
3.7.2	<i>Construção de Cenários Hipotéticos .....</i>	59
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE INVENTÁRIO .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>SERVIÇOS DE TRANSPORTE DO THI.....</b>	<b>66</b>
4.1.1	<i>Serviço de Operação de Transportes.....</i>	67
4.1.2	<i>Frota de Transporte.....</i>	74
4.1.3	<i>Infraestrutura de Transporte .....</i>	77
4.1.4	<i>Transporte Rodoviário.....</i>	79
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE IMPACTO.....</b>	<b>80</b>
<b>5.1</b>	<b>ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL UNITÁRIO.....</b>	<b>80</b>
5.1.1	<i>Impacto Ambiental Unitário dos Serviços de Transportes .....</i>	81
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DO CENÁRIO-BASE.....</b>	<b>85</b>
5.2.1	<i>Impacto Ambiental Total do Cenário-Base .....</i>	86
<b>5.3</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS.....</b>	<b>97</b>
5.3.1	<i>Impacto Ambiental Total do Cenário 1 .....</i>	97
5.3.2	<i>Impacto Ambiental Total do Cenário 2 .....</i>	106
5.3.3	<i>Impacto Ambiental Total do Cenário 3 .....</i>	116
5.3.4	<i>Impacto Ambiental Total do Cenário 4 .....</i>	120
<b>5.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>126</b>
<b>6</b>	<b>INTERPRETAÇÃO .....</b>	<b>128</b>
<b>6.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>131</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>132</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Estrutura Genérica de um Sistema de Produto. ....	11
Figura 2-2: Processo Elementar para a Fabricação de uma Barcaça.....	12
Figura 2-3: Estrutura das Etapas do Ciclo de Vida .....	13
Figura 3-1: Rota para escoar à produção de soja do MT para exportação utilizando os portos do Arco Norte .....	47
Figura 3-2: Serviços de Transporte por Hidrovia de Interior Adotados neta Tese.....	49
Figura 3-3: Trecho crítico na Passagem do Pedral dos Marmelos do rio Madeira .....	53
Figura 3-4: Critério para formação de comboio de barcaças.....	54
Figura 3-5: Formação do comboio de 09 barcaças.....	55
Figura 3-6: Formação do comboio de 12 barcaças.....	55
Figura 3-7: Formação do comboio de 16 barcaças.....	55
Figura 3-8: Formação do comboio de 20 barcaças.....	55
Figura 3-9: Comportamento da curva da média de nível d'água do rio Madeira entre 2013 e 2023 .....	56
Figura 3-10: Curvas de Nível d'Água e de Grãos Transportados .....	57
Figura 3-11: Percentual de grãos transportados por comboios de barcaças em 2023, em relação à média mensal do nível d'água entre 2013 e 2023 .....	58
Figura 3-12: Resultado da Regressão Linear da Média Mensal dos Dados de Nível e Vazão D'Água.....	60
Figura 3-13: Comportamento do Nível d'Água no Cenário 1 .....	61
Figura 3-14: Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte em Relação ao Nível D'Água no Cenário 1 .....	62
Figura 3-15: Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte do Cenário 1 .....	62
Figura 3-16: Comportamento do Nível D'Água no Cenário 2 .....	63
Figura 3-17: Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaça em Relação ao Nível D'Água no Cenário 2 .....	64
Figura 3-18: Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaça do Cenário 2 .....	64
Figura 4-1: Produção Horária dos Comboios de Barcaças.....	69
Figura 4-2: Consumo de Combustível dos Comboios de Barcaças.....	72
Figura 4-3: Consumo de diesel (ml) por tkm dos Comboios de Barcaças .....	72

Figura 5-1: Impacto Ambiental Unitário Total por tkm dos Modos de Transportes (Rodoviário e Hidroviário) .....	81
Figura 5-2: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes dos Serviços de Operação de Transporte.....	82
Figura 5-3: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte .....	83
Figura 5-4: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte.....	84
Figura 5-5: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte .....	85
Figura 5-6: Percentual de Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário-Base .....	86
Figura 5-7: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário-Base .....	87
Figura 5-8: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário-Base .....	88
Figura 5-9: Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaças do Cenário-Base .....	89
Figura 5-10: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes do Cenário-Base .	90
Figura 5-11: Impacto Ambiental Total dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base...	90
Figura 5-12: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário-Base .....	92
Figura 5-13: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário-Base .....	93
Figura 5-14: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário-Base .....	95
Figura 5-15: Percentual de Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 1 .....	97
Figura 5-16: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível d'Água no Cenário 1 .....	98
Figura 5-17: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário 1 .....	98
Figura 5-18: Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte do Cenário 1.....	99

Figura 5-19: Impacto Ambiental Total do Cenário 1 .....	100
Figura 5-20: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte dos Comboios de Barcaças do Cenário 1 .....	100
Figura 5-21: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 1 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5-22: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 1 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5-23: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 1 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5-24: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 2 .....	107
Figura 5-25: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 2 .....	108
Figura 5-26: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário 2 .....	108
Figura 5-27: Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados dos Comboios de Barcaças do Cenário 2 .....	109
Figura 5-28: Impacto Ambiental Total do Cenário 2 .....	110
Figura 5-29: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte dos Comboios de Barcaças do Cenário 2 .....	110
Figura 5-30: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 2 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5-31: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 2 .....	113
Figura 5-32: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 2 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5-33: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 3 .....	117
Figura 5-34: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 3 .....	117
Figura 5-35: Impacto Ambiental Total do Cenário 3 .....	118
Figura 5-36: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 3 .....	119

Figura 5-37: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 3 .....	119
Figura 5-38: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 3 .....	120
Figura 5-39: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 4 .....	121
Figura 5-40: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 3 .....	122
Figura 5-41: Impacto Ambiental Total do Cenário 4 .....	123
Figura 5-42: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 4 .....	124
Figura 5-43: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 4 .....	125
Figura 5-44: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 4 .....	126
Figura 6-1: Impacto Ambiental Unitário dos Serviços de Transporte do Modo Hidroviário .....	129
Figura 6-2: Impacto Ambiental Total dos Cenários .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Exemplos de categorias de impactos associados ao ICV .....	18
Tabela 2-2: Características dos modos de transportes amplamente utilizados no transporte de grãos.....	19
Tabela 2-3: Trabalhos científicos que avaliaram o ciclo de vida do transporte por hidrovias de interior.....	22
Tabela 2-4: Consumo final de diesel e de energia nas viagens dos modos de transportes .....	26
Tabela 2-5: Dados de entrada adotado por Merchan <i>et al.</i> (2019) para o modo de transporte rodoviário.....	34
Tabela 2-6: Participação de caminhões por tecnologia de motor .....	35
Tabela 2-7: Valor do Custo Externo das Categorias de Impacto Final .....	35
Tabela 2-8: Fatores de emissão do diesel, GNL e Metanol adotado pelos autores .....	39
Tabela 2-9: Valores de consumo específica de diesel, índice de emissão e emissão de CO <sub>2</sub> dos Componentes de Serviços de transportes.....	43
Tabela 3-1: Calendário de Colheita dos grãos produzidos em Mato Grosso, na safra 2022/23 .....	57
Tabela 3-2: Critérios para a formação dos comboios de barcaças .....	58
Tabela 4-1: Valores dos Fatores considerados nesta tese.....	69
Tabela 4-2: Valores da Operação de Transporte dos Comboios de Barcaças .....	71
Tabela 4-3: Valores dos gases poluentes emitidos na queima de combustível, extraído da <i>Ecoinvent</i> .....	73



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação do tema

O setor de transportes é uma das forças motrizes de uma economia, responsável pelo deslocamento de bens, por conectar mercados produtores e consumidores e por atender as necessidades de deslocamento da população.

O modo de transporte por hidrovia de interior (modo hidroviário) dispõe de atributos que o torna o mais adequado para o transporte de mercadorias de baixo valor agregado, tal como os grãos (soja e milho). Tais atributos são a: (i) elevada capacidade de carregamento; (ii) valor de frete mais competitivo; e (iii) menores custos para transportar uma tonelada a uma distância de um quilômetro (*tkm*) (Brasil, 2015; Ebert, 2005; Hofbauer e Putz, 2020).

Por outro lado, as desvantagens deste modo de transporte são: (i) maior tempo de viagem; (ii) elevados investimentos iniciais para a construção/adequação da infraestrutura hidroviária; e (iii) vulnerável às condições hidrológicas do rio (Huang *et al.*, 2020).

O Brasil tem a maior rede hidrográfica do mundo, com 63 mil quilômetros de extensão de rios, dos quais apenas 30,9% são utilizados comercialmente (Brasil, 2019). Em 2023, o perfil de cargas predominante no transporte por hidrovia de interior do país foram os grãos sólidos, representando 78,90% (101,407 milhões de toneladas) do total transportado (Brasil, 2025a). O restante, 21,10% (27,123 milhões de toneladas), se dividem entre Granel Líquido e Gasoso (9,84% - 12,65 milhões de toneladas), Carga Containerizada (6,60% - 8,483 milhões de toneladas) e Carga Geral (4,66% - 5,988 milhões de toneladas). Do total de mercadorias transportadas por meio das hidrovias de interior brasileiras, os grãos (soja e milho) representaram 46,11% (59,262 milhões de toneladas), com a bauxita representando 13,93% (17,910 milhões de toneladas).

Os grãos (soja e milho) fazem parte de um importante setor econômico do país, cuja importância na economia brasileira pode ser observada na composição do PIB de 2023, que representou 23,2% do PIB do agronegócio e 5,9% do PIB brasileiro, um montante de R\$ 635,9 bilhões (Cepea e Abiove, 2024).

O Estado do Mato Grosso (MT) é o principal produtor de grãos do país, responsável por 33,67% (96,841 milhões de toneladas) na safra de 2022/23, enquanto o segundo maior produtor, que é o Estado do Paraná (PR), respondeu por 14,22% (40,894 milhões de toneladas) (Brasil, 2025b).

A infraestrutura logística destinada à escoar a produção de grãos com destino aos mercados internacionais, é conhecida por Corredores Logísticos de Desenvolvimento, que tem função indutora de desenvolvimento econômico e regional, composto por rotas de transportes modal e multimodal (Brasil, 2017a). Este sistema de transporte é dividido em quatro Corredores Logísticos (Norte, Nordeste Sudeste e Sul), cuja infraestrutura é compartilhada com os fluxos de abastecimento interno e para exportação. No que se refere aos fluxos de exportação, os Corredores Logísticos são divididos em nove Eixos (Madeira, Tapajós, Tocantins, São Luís, Salvador, Vitória, Santos, Paranaguá e Rio Grande).

O sistema portuário brasileiro conta com 36 portos organizados, um total de 226 Terminais de Uso Privado (TUP) e 44 Estações de Transbordo de Carga (ETC). No Brasil, há um conjunto de instalações portuárias cuja localização situa-se acima do paralelo 16°S, que compreende os portos de Porto Velho (RO), portos dos Estados do Amazonas, do Amapá, do Pará e do Maranhão (Dombrow Junior, 2017). Para conseguir exportar os grãos produzidos no MT, está disponível a infraestrutura logística do Eixo Madeira, que utiliza o rio Madeira como um dos elos desta cadeia logística.

O rio Madeira tem os períodos de cheia e seca muito bem definidos, cuja amplitude em 2023 foi de 13,52 metros considerada elevada (Brasil, 2025c). Contudo, o modo hidroviário é vulnerável às condições hidrológicas, que são sensíveis às condições climáticas. Kievits (2019) afirma que as mudanças climáticas são cada vez mais apontadas como a principal causa de interrupções do modo hidroviário, tendo os baixos níveis d'água como a principal ameaça à navegação, em razão de uma duração geralmente mais longa. Segundo o mesmo autor, os impactos no modo hidroviário são: (i) redução da capacidade de carregamento; (ii) aumento no tempo de viagem; e (iii) redução da janela de tempo de navegação.

As mudanças climáticas já são uma realidade. Aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos em todo o globo terrestre vem se confirmando frente aos modelos teóricos de previsão climático elaborados e constantemente atualizados por entidades científicas mundo afora (IPCC, 2021). Segundo previsões elaborados por este organismos, mantendo os níveis atuais de poluição das atividades antrópicas, é tido como certo o descumprimento da meta estabelecida no Acordo de Paris, manter a temperatura média global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais (1750) e empregar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (UN, 2015).

As preocupações climáticas foram de tal forma que culminou na celebração de diversos tratados internacionais, tal como o Protocolo de Kyoto, celebrado em 1997 e ratificado em 2005 por 195 países, que trata da operacionalização da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*), a partir do compromisso dos países industrializados e das economias em transição a limitar e reduzir as emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), de acordo com as metas individuais acordadas, por meio da adoção de políticas e medidas de mitigação, e com apresentação de relatórios periódicos (ONU, 1997).

As previsões futuras para o clima tem o prognóstico de aumentar a frequência e intensidade de eventos climáticos extremos até o final do século XXI (IPCC, 2021). Christodoulou *et al.* (2020) afirma que os baixos níveis d'água são mais nocivos ao Transporte por Hidrovia de Interior (THI) que o aumento excessivo do nível d'água e formação de gelo.

No contexto em que as mudanças climáticas já são uma realidade, faz-se necessário elaborar cenários cuja condição hidrológica se assemelhe às previsões de mudanças climáticas, com vistas a verificar o impacto no transporte de grãos por hidrovia de interior. Diante disto, verificou-se na literatura científica que o método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) permite quantificar o impacto ambiental potencial de um sistema de produto/serviço, que no caso desta tese, é o transporte de grãos por hidrovia de interior (Mark Goedkoop *et al.*, 2016; ISO, 2006).

Na literatura científica, foram identificados poucos trabalhos que aplicam o método ACV no modo hidroviário, e não foram encontrados trabalhos que consideram no modelo de operação de transporte a condições hidrológica, sendo esta uma inovação.

## **1.2 Problema de Pesquisa**

Conforme apresentado no capítulo anterior, o nível d'água do rio Madeira tem uma variação hidrológica considerada elevada, cuja amplitude em 2023 foi de 13,52 metros, com o menor nível d'água atingindo 1,46 metros de profundidade, medidos na régua da estação hidrológica do porto de Porto Velho/RO, comprometendo a operação de transportes de grãos.

Christodoulou *et al.*, (2020) afirmam que os eventos climáticos extremos em um rio ocorrem de duas formas:

- i. Enchente: quando o nível d'água excede o limite máximo previsto para o rio; e
- ii. Seca: quando o nível d'água fica criticamente baixo, impondo limitações à navegação, e em casos extremos a suspensão do serviço.

No contexto do transporte de grãos por hidrovia de interior, a seca tende a ser mais nociva que a enchente, cujo impacto impõem restrições à capacidade de carregamento e, em casos extremos, a suspensão da operação de transporte.

No que se refere ao clima, IPCC (2021) prevê que um aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos até o final do século XXI, oriundo, segundo autor, das atividades antrópicas.

Neste contexto, o problema de pesquisa desta tese é: como a variação hidrológica impacta na performance ambiental do transporte de grãos hidroviário de interior? As respostas deste questionamento têm o potencial de identificar ações mitigadoras para o THI.

### **1.3 Justificativa**

IPCC (2021) afirma que o as evidências de mudanças climáticas já são observados em todas as regiões do planeta Terra, dado pelo aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos (ondas de calor, forte precipitação, período de seca fora de época, ciclones tropicais, entre outros) aumentando ao longo do anos, que tem relação com o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), oriundo das atividades antrópicas. Desde 1750, as concentrações de  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2O$  – elementos que compõem a categoria GEE – aumentaram em 47%, 156% e 23%, respectivamente, quantidade semelhante aos períodos glacial e interglacial (IPCC, 2021).

No Brasil, entre 1950 e 2014, a temperatura média (°C) anual aumentou em 4,73%, enquanto a precipitação média (mm) anual reduziu em 3,53%. Tendo como base este período (1950-2014), a previsão futura mais conservadora de temperatura e precipitação, até o final do século XXI, é um aumento de 6,56% e redução de 2,80%, respectivamente (WBG, 2023). Por outro lado, no cenário pessimista, o Brasil terá um aumento de 12,75% na temperatura média, enquanto a precipitação reduzirá em 6,59%, impactando diretamente no ciclo hidrológico, o que pode trazer sérias consequências para as operações do modo hidroviário.

Embora estudos anteriores tenham abordado as emissões e impactos ambientais do THI, há uma lacuna significativa na literatura relacionada ao impacto da variação hidrológica nas operações de transporte do THI. A variação dos níveis d'água nas hidrovias, como o rio Madeira, representa uma ameaça à capacidade de transporte e à eficiência energética, em especial no período de seca, momento em que os níveis d'água são mais baixos. Em um contexto em que as mudanças climáticas já são uma realidade, e tendem a aumentar os eventos climáticos extremos, a presente pesquisa traz uma oportunidade relevante para estudos futuros.

Os Componentes de Construção e Manutenção de Infraestruturas relacionados aos canais e instalações portuárias, representam uma parcela significativa dos impactos ambientais do modo hidroviário, conforme apontado em estudos anteriores. No entanto, a literatura carece de avaliações detalhadas que explorem a otimização desses processos, principalmente considerando a realidade de hidrovias naturais em relação a hidrovias artificiais. A introdução de novas tecnologias menos nocivas ao meio ambiente tende a ser um campo de pesquisa promissor.

A pesquisa sobre combustíveis alternativos, embora avançada em outros modos de transporte, ainda está em fase inicial no modo hidroviário. A investigação sobre a viabilidade e os impactos ambientais da substituição de fontes energéticas alternativas (GNL, hidrogênio e metanol) nas embarcações fluviais permite surgir novas perspectivas para a descarbonização do modo hidroviário, tornando essa uma área de grande relevância.

A integração do método ACV com outros modelos de gestão ambiental, como os sistemas de gestão de energia e resíduos nas operações de transporte, ainda é pouco explorada no contexto brasileiro. Isso poderia ser um diferencial na busca por uma operação mais sustentável, alinhando as metas de eficiência com as demandas ambientais e regulatórias.

A maioria dos estudos sobre ACV e THI concentra-se em países europeus e da América do Norte, com poucas análises focadas em regiões tropicais, como a Amazônia brasileira. Considerando as peculiaridades da hidrografia e os desafios ambientais da região, há uma lacuna significativa que pode ser explorada em futuras pesquisas, particularmente no que tange aos impactos da infraestrutura e à variação de regimes hidrológicos.

#### **1.4 Contribuição Científica e Ineditismo da Tese**

Este trabalho, ao aplicar o método ACV no transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira, apresenta uma contribuição científica relevante ao:

- Integrar dados hidrológicos específicos da região amazônica com uma análise de ciclo de vida, permitindo uma visão detalhada dos desafios e oportunidades para a mitigação dos impactos ambientais no modo hidroviário;
- Avaliar o impacto ambiental do THI sob condições hidrológicas adversas;
- Propor cenários hipotéticos que consideram as variações do nível d'água, oferecendo uma perspectiva inovadora sobre a resiliência do modo hidroviário frente às mudanças climáticas.

Ao identificar as lacunas existentes e explorar oportunidades de melhoria e inovação, esta pesquisa não só contribui para a literatura acadêmica, mas também pode informar políticas públicas e estratégias de gestão ambiental no setor de transporte por hidrovia de interior. Os resultados e *insights* gerados têm o potencial de impactar diretamente em operações de transporte sustentáveis e a resiliência do transporte de *commodities* no Brasil, em um cenário de crescentes pressões ambientais e climáticas.

#### **1.5 Premissas e Hipóteses**

As premissas adotadas nesta pesquisa foram definidas com base na relevância dos elementos avaliados e na adequação ao escopo do estudo. Essas premissas garantem a consistência metodológica e a aplicabilidade dos resultados no contexto do transporte hidroviário no Brasil.

As premissas estão no parágrafo a seguir:

- O consumo de combustível e o impacto ambiental foram estimados a partir de modelos consolidados na literatura científica, ajustados ao contexto nacional.
- Foram desenvolvidos Cenários Hipotéticos para simular alterações no nível d'água em um contexto de mudanças climáticas, e alterações na logística.

- Nos Cenários Hipotéticos, o impacto das mudanças climáticas na produção de grãos foi desconsiderado em razão da sua complexidade em se medir seus efeitos na agricultura.

A partir do problema de pesquisa, tem-se como hipótese principal é que: a piora da navegabilidade impõe restrições às operações de transporte por hidrovia de interior, prejudicando a performance ambiental do transporte de grãos obtida a partir da análise do ciclo de vida.

As hipóteses secundárias são:

1. A literatura científica carece de trabalhos que tratem do impacto ambiental da variação hidrológica do transporte de grãos por hidrovia de interior, utilizando para isto o método ACV;
2. A elaboração de um modelo de operação de transporte por hidrovia de interior permitirá constatar as medidas mitigadoras para o impacto da variação hidrológica no transporte de grãos;
3. A piora da navegabilidade prejudica a eficiência operacional e ambiental do modo aquaviário, cuja medida mitigadora para o transporte de grãos é a integração com outros modos de transportes menos vulneráveis à condição hidrológica.

Estas hipóteses baseiam-se em uma revisão da literatura sobre o transporte hidroviário no Brasil, com foco no impacto do nível d'água na eficiência operacional e ambiental. O método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) foi usado para testar essas hipóteses, considerando indicadores como consumo de combustível, emissões e eficiência do sistema de transporte.

## **1.6 Objetivos da Pesquisa**

O objetivo geral desta tese é analisar o impacto da variação hidrológica no ciclo de vida do transporte de grãos por hidrovia do rio Madeira.

Diante disto, os objetivos específicos considerados nesta tese, são:

1. Identificar as aplicações do método ACV no transporte por hidrovia de interior no contexto de mudanças climáticas;
2. Desenvolver um procedimento metodológico para análise de ciclo de vida de uma hidrovia de interior, considerando o comportamento hidrológico e o seu modelo de operação;
3. Avaliar os impactos ambientais da operação de transporte da hidrovia de interior na análise de ciclo de vida;

## 1.7 Estrutura da Tese

A presente tese está organizada em sete seções principais, com o objetivo de estruturar e apresentar de forma clara e sequencial os elementos necessários para o desenvolvimento do estudo. A seguir, é apresentada a estrutura adotada:

**Capítulo 1 - Introdução:** Este capítulo apresenta o tema da pesquisa, o problema investigado, a justificativa do estudo, as contribuições científicas e o ineditismo da tese. Também são descritos as premissas, hipóteses e os objetivos geral e específicos da pesquisa.

**Capítulo 2 - Análise de Ciclo de Vida (ACV):** Neste capítulo, são abordados os marcos teóricos e o contexto histórico do método ACV, incluindo suas etapas, conceitos fundamentais, aplicações em sistemas de transporte e, mais especificamente, em transporte por hidrovia de interior.

**Capítulo 3 - Definição de Objetivo e Escopo da ACV:** Este capítulo detalha os objetivos específicos da aplicação do método ACV (Fase I), delimitando as fronteiras do sistema, a unidade funcional adotada, o comportamento hidrológico do rio Madeira, os cenários analisados e os critérios para a formação dos comboios de barcaças.

**Capítulo 4 - Análise de Inventário:** Neste capítulo, são apresentados os dados coletados e os procedimentos de cálculo que compõem o inventário do ciclo de vida do transporte hidroviário (Fase II), detalhando os serviços de transporte considerados no estudo.

**Capítulo 5 - Análise de Impacto:** Aqui são descritos os resultados da aplicação do método ACV (Fase III), com foco nos impactos ambientais unitários e totais dos diferentes cenários e serviços de transporte analisados.



**Capítulo 6 - Interpretação:** Este capítulo sintetiza os resultados obtidos nas fases anteriores, interpretando-os à luz do objetivo geral da pesquisa e discutindo os pontos críticos e as possibilidades de mitigação dos impactos ambientais (Fase IV).

**Capítulo 7 - Conclusão:** Por fim, são apresentadas as conclusões do estudo, as contribuições para a literatura e as implicações práticas, além de sugestões para futuras pesquisas.

## 2 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV)

### 2.1 Contexto Histórico do Método ACV

O método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) surgiu por volta de 1970 no Instituto de Pesquisa do Centro-Oeste (*Midwest Research Institute*), nos Estados Unidos da América (EUA), com o intuito de analisar de forma comparativa as embalagens sob o aspecto ambiental, tendo em vista à conservação de recursos e economia de energia (Klopffer, 1997).

No final dos anos 80, o aumento das preocupações com as externalidades negativas das atividades antrópicas no meio ambiente, tornou este método popular, com aplicações em diversos tipos de bens e serviços, visando determinar todos os encargos ambientais do ciclo de vida; da matéria prima até a remoção de resíduos, do “berço ao túmulo” (*cradle to grave*) (Klopffer, 1997)

Em 1993, a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) publicou o *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"* que define o método ACV e discute diversas aplicações (SETAC, 1993). A *International Organization for Standardization* (ISO) elaborou uma série de normas que trata desta temática, e foi traduzida e publicada no Brasil por meio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), representante da ISO no Brasil:

- ABNT ISO 14040:2009 – trata dos princípios e a estrutura do método ACV (ABNT, 2009a);
- ISO 14044:2009 – aborda requisitos específicos e fornece diretrizes para a aplicação do método ACV, incluindo (ABNT, 2009b):
  - Fase I: Definição dos objetivos e escopo do método ACV;
  - Fase II: Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV);
  - Fase III: Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV);
  - Fase IV: Interpretação do Ciclo de Vida;
  - Relatórios e revisão crítica do método ACV;
  - Limitações do método ACV;
  - Relação entre as Fases do método ACV; e
  - Critérios para seleção de valor e elementos opcionais do método ACV;

## 2.2 Introdução ao Método ACV

A ABNT (2009a) define a Análise de Ciclo de Vida como um método para quantificar o impacto ambiental potencial de produto e/ou serviço por meio de estágios sequenciadas do ciclo de vida de um sistema de produto e/ou serviço, tais como: extração de recursos naturais, produção de energia e materiais (insumos para a manufatura de bens (produtos final) ), manufatura de bem, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final do produto. Esta abordagem é conhecida por “do berço ao túmulo.

Um sistema de produto é composto por processos elementares (unitários) conectados por fluxos de produtos intermediários (fluxos intermediários) que executam uma ou mais funções definidas, no qual a propriedade essencial é caracterizada pela sua função, e não em termos de produto ou serviço (Figura 2-1) (Hauschild, 2018).

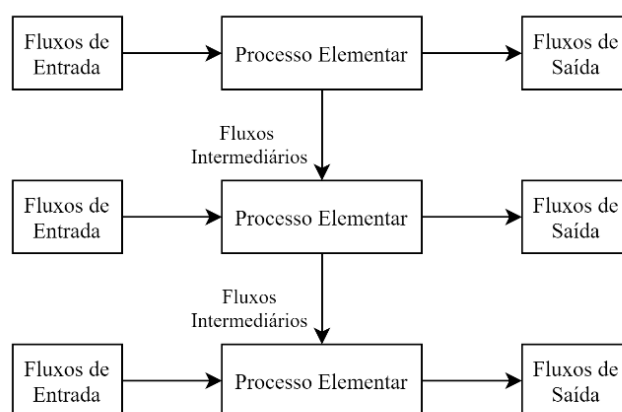


Figura 2-1: Estrutura Genérica de um Sistema de Produto.  
Fonte: (ISO, 2006)

Bjørn et al. (2018) afirmam que o modelo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) é construído a partir dos dados coletados dos processos elementares, no qual, as entradas (recursos) e as saídas (resultados) são quantificados. Segundo o mesmo autor, as entradas e saídas são organizadas na forma de fluxos (Figura 2-2).

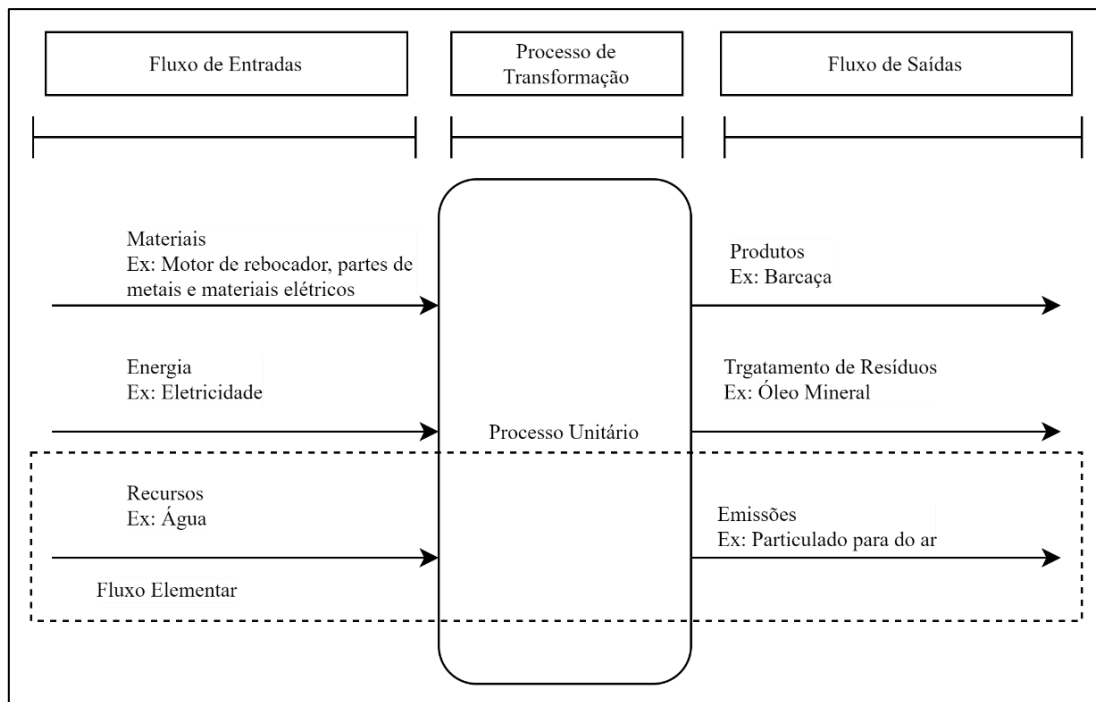


Figura 2-2: Processo Elementar para a Fabricação de uma Barça  
 Fonte: Adaptado de Bjørn *et al.*, (2018).

O Fluxo de Entradas é caracterizado pelos recursos necessários no Processo de Transformação. Os resultados são os produtos/serviços e suas externalidades negativas, tal como, as emissões de poluentes, geração de resíduos, entre outros, denotando, desta forma, o Fluxo de Saídas.

### 2.3 Estrutura do Método ACV

O método ACV é estruturado em quatro fases (Figura 2-3): Fase I: Definição do Objetivo e do Escopo; Fase II: Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV); Fase III: Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e Fase IV: Interpretação dos Resultados.

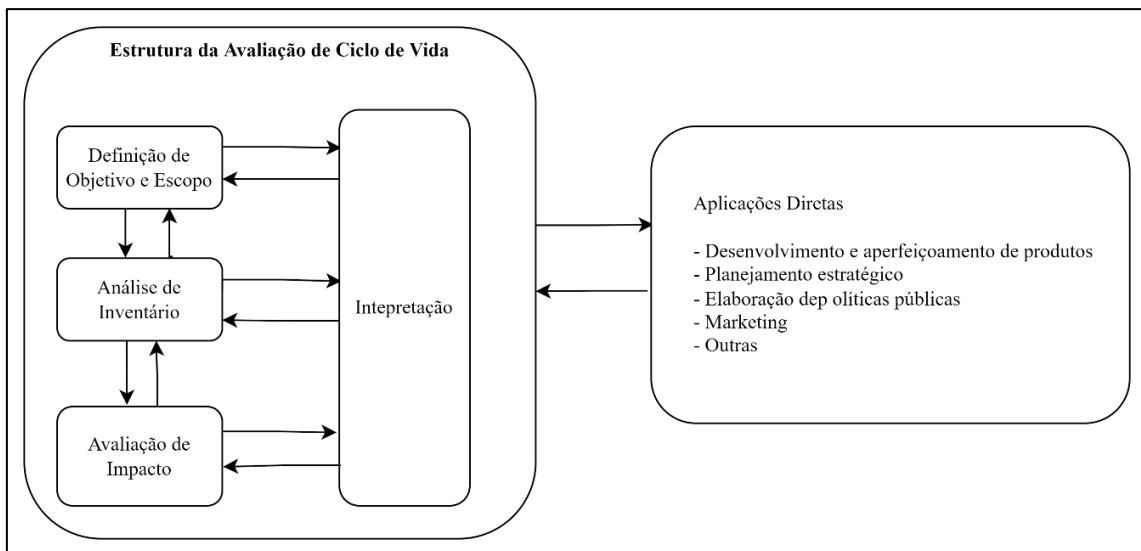


Figura 2-3: Estrutura das Etapas do Ciclo de Vida

Fonte: ABNT (2009a, p. 8).

As Fases do método ACV estão descritas a seguir.

### 2.3.1 Fase I: Definição de Objetivo e Escopo

A definição do objetivo consiste na declaração da (1) aplicação pretendida, das (2) justificativas para sua execução, do (3) público-alvo e (4) se há intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente (Bjørn *et al.*, 2018). Hauschild (2018) também considera as (5) limitações das escolhas metodológicas, o (6) contexto da decisão e os (7) principais atores influentes.

A definição do escopo consiste na descrição detalhada do sistema de produto, incluindo as funções e fronteira do sistema, a unidade funcional, os procedimentos de alocação, as categorias de impacto adotadas, o método para Análise de Impactos e interpretação, requisitos quanto à qualidade dos dados, os pressupostos, as limitações da aplicação, o tipo de análise crítica, as características de relatório (tipo e formato) para o estudo (ABNT, 2009a; Hauschild, 2018).

É importante destacar a importância de se determinar com clareza uma unidade funcional, tendo em vista a unificação de uma unidade de medida de referência para o sistema de produto em questão, o que permite assegurar a possibilidade de comparar os resultados do método ACV. A definição da unidade funcional é especialmente crítica quando se avalia distintos sistemas de produtos, com um papel de assegurar uma unidade de medida comum.

A fronteira do sistema é definida a partir dos processos elementares contidos no sistema de produto em avaliação, em consonância com o objetivo da aplicação do método ACV, considerando as restrições de dados e de custos e alinhado os pressupostos adotados e determinar os estágios do ciclo de vida do sistema de produto em avaliação.

Como é possível observar, esta fase é de suma importância por nortear as decisões a serem tomadas nas fases subsequentes do método ACV, no qual, tais informações sejam apresentadas de forma clara, objetiva e inequívoca.

### **2.3.2 Fase II: Análise de Inventário**

A segunda fase do método ACV consiste na quantificação das entradas e saídas do sistema de produto. As entradas consistem nos recursos utilizados no processo elementar (matérias-primas, produtos intermediários, coprodutos, energia, entre outros) que culminará no produto/serviço (saída), incluindo as externalidades negativas, tal como, emissão de poluição atmosférica, sonora e visual, radioativa, hídrica, térmica, entre outros (ABNT, 2009a).

Crawford (2011) afirma que há três métodos de cálculo dos dados, utilizado no processo de quantificação desses dados:

- i. Processo de Análise (*Bottom-Up Approach*): utiliza uma combinação de dados específicos do ciclo de vida do produto/serviço em avaliação, com vistas a calcular as cargas ambientais e os impactos relacionados do sistema de produto em avaliação. Essa abordagem é geralmente mais precisa e relevante, contudo, pode ser trabalhoso e demorado.
- ii. Análise Insumo-Produto (*Top-Down Approach*): é uma técnica econômica que utiliza matrizes de transações monetárias setoriais (tabelas de insumo-produto) que descrevem as complexas interdependências dos setores econômicos para rastrear as necessidades de recursos e as emissões de poluentes em toda a economia. A partir dos dados de entrada e saída de um determinado setor econômico, bem como o valor monetário total de todos os produtos desse setor, é então possível determinar a quantidade de recursos necessários ou emissões liberadas por unidade monetária dos produtos de cada setor econômico. Essa abordagem é eficaz no contexto macroeconômico, sendo pouco útil em sistemas de produtos por exigir dados desagregados baseados em processos de um produto.

- iii. Análise Híbrida: essa abordagem é a união das duas abordagens anteriores. Nessa abordagem, os processos à jusante (fabricação, uso e fim de vida) e alguns processos à montante, de baixa importância da unidade funcional são examinados em uma análise detalhada do processo, enquanto os processos de elevada importância (extração e produção de materiais) são cobertos pela análise de insumo-produto.

Os dados coletados passam por um procedimento de cálculo, que inclui: a (1) validação; (2) a correlação dos dados aos processos elementares; e (3) a correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional (ABNT, 2009a).

O resultado desta fase é a formação do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), que é uma base de dados contendo a quantificação das entradas e saídas dos fluxos elementares do sistema produtivo. O ICV é o insumo para a Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), dado na Fase III do método ACV.

### **2.3.3 Fase III: Análise de Impacto**

A AICV tem o objetivo de avaliar a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto sob a perspectiva ambiental que utiliza as categorias de impacto e indicadores de categoria em conjunto com os resultados da análise do inventário de ciclo de vida (Rosenbaum *et al.*, 2018).

A partir disto, torna-se importante definir impacto ambiental. Para a Resolução CONAMA nº 1 de 1986 (Brasil, 1986), impacto ambiental consiste em qualquer modificação das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, provocada por qualquer forma de matéria ou energia em decorrência de ações antrópicas direta ou indiretamente, no qual considera-se os aspectos relacionados à saúde, à segurança e ao bem-estar da população, tais como: atividades sociais e econômicas, biota, condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e qualidade dos recursos ambientais. Desta forma, avaliar os impactos ambientais é uma forma de quantificar a significância da interferência antrópica no meio ambiente.

O desenvolvimento adequado de uma AICV compreende o cumprimento de etapas obrigatórias (Seleção das Categorias de Impacto, Indicadores de Categoria e Modelos de Caracterização, Classificação e Caracterização) e opcionais (Normalização,

Ponderação de Pesos e Agrupamento) apresentadas a seguir. As etapas opcionais não serão abordadas nesta tese.

### 2.3.3.1 Etapas Obrigatórias do AICV

- Seleção das Categorias de Impacto, Indicadores de Categoria, Modelo de Classificação e Modelo de Caracterização:

Esta etapa consiste em identificar as categorias de impacto, os indicadores de categoria e os modelos de caracterização mais adequados ao objetivo definido na Fase I. Para isto, um conjunto de parâmetros deve ser respeitado, como: (a) não ser redundante; (b) não disfarçar impactos significativos; (c) ter uma abordagem completa dos impactos ambientais; e (d) permitir a rastreabilidade.

Rosenbaum *et al.* (2018) afirmam que uma série de indicadores de categoria baseadas em na combinação de modelos de caracterização específicos, ou utilizam métodos predefinidos que em geral referem-se aos métodos de AICV. No entanto, o crescente número disponível de métodos e indicadores de AICV exige do tomador de decisão um esforço para compreender as suas principais características, além de manter-se atualizado no surgimento de novos métodos, disponíveis nos sistemas computacionais para ACV, tal como ReCiPe, CML, TRACI, EDIP, LIME, IMPACT 2002+, entre outros.

- Classificação

Nesta etapa, atribui-se os resultados do ICV às categorias de impacto de acordo com seus efeitos potenciais conhecidos. Um exemplo para isto é a emissão de um conjunto de gases poluentes que levam ao aquecimento global. Da mesma forma, a liberação de fosfatos e nitratos no meio ambiente pode gerar sua concentração não-natural em um ecossistema.

Frequentemente, determinados elementos do sistema de produto (entrada e/ou saída) contribuem para mais de um impacto ambiental, e são atribuídas de forma proporcional, ou total, às respectivas categorias de impacto. Por exemplo, o consumo de energia pode afetar tanto o aquecimento global, quanto o esgotamento dos recursos naturais, dependendo da fonte e do tipo de energia utilizada (Crawford, 2011).



- Caracterização

Esta etapa tem o objetivo de quantificar o impacto das entradas e saídas de um sistema de produto de acordo com o mecanismo ambiental<sup>1</sup>, por meio da conversão dos resultados do ICV em uma mesma unidade de medida, utilizando os Fatores de Caracterização, que indicam os impactos relacionados ao ambiente natural, saúde humana ou recursos naturais (Área de Proteção), o que permite a comparação direta dos fluxos elementares do ICV (Crawford, 2011; JRC, 2010).

Para isto, os fluxos elementares contidos no ICV são avaliados de acordo com seu grau de contribuição para um determinado impacto ambiental. Desta forma, a Pontuação de Impacto (*PI*) para uma determinada categoria de impacto *c* é dada por meio do somatório das intervenções relevantes *i* do produto entre os Fluxos Elementares (*FE*) pelo respectivo Fator de Caracterização (*FC*), conforme Equação 2-1:

$$PI_c = \sum_i (FC_i \times FE_i) \quad \text{Equação 2-1}$$

A seguir, apresenta-se a definição das categorias de impactos relacionados à emissão de poluentes, à extração de recursos naturais e aos indicadores de impacto de Pontos intermediário (*Midpoint Indicator*) e Final (*Endpoint Indicator*), a ser exposto a seguir (Rosenbaum *et al.*, 2018).

### **i. Indicadores de Impacto Ambiental**

A seleção de um indicador de impacto precisa considerar o equilíbrio entre o: (1) início do mecanismo ambiental, no qual o resultado é obtido por meio de previsões em laboratórios, distante da realidade *in loco*; e (2) final (à jusante) do mecanismo ambiental, fornecendo informações mais relevantes, mas de difícil verificação (Hauschild, 2018).

---

<sup>1</sup> Mecanismo Ambiental: sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto, no qual os resultados da análise do ICV são vinculados aos indicadores de categoria e às Categorias de Ponto Final, sendo esta última um atributo, ou aspecto, relacionado Área de Proteção, o que permite identificar uma questão ambiental merecedora de atenção (ABNT, 2009a).

A partir destas considerações, foi possível inferir que o item (1) representa o Indicador de Impacto de Ponto Intermediário (*Midpoint Impact Indicator*)<sup>2</sup>; e o item (2) representa o Indicador de Impacto de Ponto Final (*Endpoint Impact Indicator*), que trata da Área de Proteção, conforme apresentado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Exemplos de categorias de impactos associados ao ICV

Indicador de Ponto Intermediário	Escala	ICV	Indicador de Ponto Final		
			Saúde Humana	Ambiente Natural	Recursos Naturais
Mudança Climática	Global	Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ); Dióxido de Nitrogênio ( $NO_2$ ); Metano ( $CH_4$ ); Clorofluorcarbonos (CFC)	X	X	
Destruição do Ozônio Estratosférico	Global	Clorofluorcarbonos (CFC), Brometo de Metila ( $CH_3Br$ ), Hidroclorofluorcarbonos (HCFC), Halons	X	X	
Toxicidade Humana	Local	Produtos químicos tóxicos com concentrações letais		X	
Formação de Material Particulado	Global, Regional, Local	Liberações totais para o ar, água e solo	X		
Radiação Ionizante	Local	Produtos químicos tóxicos com concentrações letais	X	X	
Formação Fotoquímica de Ozônio	Local	Hidrocarboneto Não-Metano (NMHC)	X	X	
Acidificação	Regional, Local	Óxidos de Enxofre ( $SO_x$ ), Óxidos de Nitrogênio ( $NO_x$ ), Ácido Clorídrico (HCL), Ácido Fluorídrico (HF)		X	
Eutrofização	Regional, Local	Fosfato ( $PO_4$ ), Óxido de Nitrogênio (NO), Dióxido de Nitrogênio ( $NO_2$ ), Nitratos		X	
Ecotoxicidade (Terrestre e Aquática)	Local	Produtos químicos tóxicos com uma concentração letal		X	
Uso da Terra	Global, Regional, Local	Quantidade descartada em um aterro ou outras modificações de terreno		X	
Uso de Água	Regional, Local	Água consumida	X	X	X
Uso de Recursos Naturais	Global, Regional, Local	Quantidade de recursos naturais utilizados	X	X	X

Fonte: Adaptado de Fox-Lent *et al.* (2019)

<sup>2</sup> Indicador de Impacto de Ponto Intermediário (*Midpoint Indicator*): reunião dos resultados do inventário em grupos de fluxos de substâncias com capacidade de contribuir para um mesmo efeito ambiental (Hauschild, 2018).

Nesta tabela, os elementos do ICV estão relacionados aos eventos (Indicador de Ponto Intermediário) que culminam nos danos à área de proteção (Indicador de Ponto Final), e as respectivas escalas de impacto (local, regional e/ou global).

#### 2.3.4 **Fase IV: Interpretação**

A interpretação dos resultados obtidos nas fases anteriores deve estar de acordo com o objetivo e escopo do estudo (Fase I).

Nesta fase, analisa-se os resultados das fases anteriores à luz das incertezas dos dados utilizados e das suposições inferidas ao longo do estudo. O resultado da Interpretação são conclusões ou recomendações que (1) estejam de acordo com a definição do objetivo e com as restrições do escopo imposta ao estudo; e (2) considerem a adequação da unidade funcional e dos limites do sistema. As conclusões desta fase devem permitir evidenciar sua robustez e potenciais fraquezas à luz de quaisquer limitações identificadas no estudo (Hauschild *et al.*, 2018).

#### 2.4 **Método ACV Aplicado em Sistemas de Transportes**

O método ACV é amplamente utilizado com o objetivo de quantificar os potenciais impactos ambientais considerando as peculiaridades do ciclo de vida dos diferentes modos de transportes (Nascimento, 2021).

A Tabela 2-2 dispõe das características dos modos de transportes utilizados no transporte de *commodities* agrícolas (grãos), que são: hidroviário, ferroviário e rodoviário (Brasil, 2019; CODOMAR e AHIMOR, 2018; Ebert, 2005; Novo, 2016; Teixeira *et al.*, 2018).

Tabela 2-2: Características dos modos de transportes amplamente utilizados no transporte de grãos

Indicador	Modo de Transporte		
	Hidro	Ferro	Rodo
Unidade Equivalente	1 comboio, 6000 t. (4 chatas e 1 empurrador)	2,9 comboios Hopper, 86 vagões de 70 t.	172 carretas de 35 t.
Cons. Médio de Combustível por <i>tkm</i>	4,1 litros	5,7 litros	15,4 litros
Emissão de $CO_2$ ( $gCO_2/TKU$ )	20,0	23,3	101,2

Indicador	Modo de Transporte		
	Hidro	Ferro	Rodo
Frete para distância maior que 1500 Km (R\$/tkm)	R\$ 0,06	R\$ 0,12	R\$ 0,16
Custo Combustível (R\$/1000 tkm)	R\$ 10,47	R\$ 20,94	R\$ 201,02
Custo de Acidentes (R\$/1000 tkm)	R\$ 0,1818	R\$ 0,9594	R\$ 3,5481
Uso de Energia (Kcal/tkm)	0,10	0,32	1,20

Nesta tabela, observa-se o menor valor de consumo médio de combustível por tkm, com os modos ferroviário e rodoviário consumindo, respectivamente, 39,02% e 275,61% mais que o modo hidroviário. De forma análoga, nas emissões de  $CO_2/tku$ <sup>3</sup>, os modos ferroviário e rodoviário emitiram, respectivamente, 16,50% e 406,00% mais que o modo hidroviário.

No uso de energia por tkm, os modos ferroviário e rodoviário consomem 220% e 1.100% mais energia quando comparado com o modo hidroviário, evidenciando a eficiência energética deste último em relação aos demais modos de transportes.

Em termos de custos, o modo hidroviário tem o menor custo com combustível por tkm. Por outro lado, os custos com combustível por tkm dos modos ferroviário e rodoviários são, respectivamente, o dobro e 20 vezes maiores que o modo hidroviário.

Além disto, o modo hidroviário tem o menor custo de acidentes por tkm, com os modos ferroviário e rodoviário representando, respectivamente, pouco mais de quatro vezes e quase 20 vezes o valor do modo hidroviário.

Os baixos custos do modo hidroviário justificam o menor valor de frete em relação aos modos terrestres (ferroviário e rodoviário). Em termos comparativos, o valor do frete do modo hidroviário é a metade do valor do modo ferroviário, e quase dois terços do valor do modo rodoviário.

---

<sup>3</sup> TKU –Tonelada-Quilômetro Útil: unidade de medida equivalente ao transporte de uma tonelada útil (TU) em um quilômetro. A “tonelada útil (TU)” é o total de carga movimentada no transporte remunerado (Brasil, 2008). Nesta tese, foi adotada a unidade de medida tonelada-quilômetro (tkm) que é uma unidade de medida de transporte de cargas, que representa o transporte de uma tonelada de mercadorias (incluindo embalagens e taras de unidades de transporte intermodal) por um determinado modo de transporte (rodoviário, ferroviário, aéreo, marítimo, entre outros) em uma distância de um quilômetro (European Union, 2025).

A partir desses dados, é possível afirmar que o THI é a alternativa menos nociva ao meio ambiente, com a maior eficiência energética, além de ter os menores custos e valor de frete para o transporte de grãos.

Diante disto, conclui-se que o THI é o modo de transporte mais adequado para o transporte de grãos, uma vez que seu valor agregado é baixo, o que confere ao Brasil uma vantagem competitiva em relação aos países que não dispõem deste modo de transporte para escoar a produção de grãos.

## **2.5 ACV em Transporte por Hidrovia de Interior**

O levantamento da literatura desta temática contou com a busca de trabalhos publicados em bases de dados científicas, tais como *ScienceDirect*, *Web of Science* e *Scopus*. Tais bases de dados são amplamente utilizadas por pesquisadores da área de Engenharia.

A combinação de palavras-chave adotadas foram: "*inland waterway*" AND "*life cycle*"; "*Barge*" AND "*Life Cycle*"; "*commodities*" AND "*freight*" AND "*LCA*" AND "*inland waterway*" e "*commodities*" AND "*transport*" AND "*LCA*" AND "*inland waterway*". Foram identificadas 1990 publicações nas três bases de dados, e desse total foram analisadas 45 publicações (artigos de revistas e de congressos científicos e livros) por apresentarem pelo menos uma das palavras-chave nos campos relacionados ao título, *abstract* ou palavra-chave.

Os trabalhos selecionados foram publicados em revistas científicas de ampla aceitação pela comunidade científica, indexados no *Journal Citation Reports* (JCR) de 2024, com Fator de Impacto maior que 1 (um) em 2024.

Tais trabalhos estão dispostos na Tabela 2-3, que apresenta uma síntese dos seus objetivos, da definição dos objetivos e escopo (Fase I do ACV), da unidade funcional adotada e o contexto geográfico no qual se refere o objeto de estudo.

Tabela 2-3: Trabalhos científicos que avaliaram o ciclo de vida do transporte por hidrovia de interior

Autor	Objetivo da Pesquisa	Fase I			Contexto Geográfico
		Objetivo	Escopo	Unidade Funcional	
(Spielmann e Scholz, 2005)	Apresenta e discute a estrutura de um modelo, premissas básicas e resultados para serviços de transporte de carga.	Fornecer dados básicos para serviços de transportes para completar uma variedade de ciclos de vida do produto.	Modelo genérico de transportes de cargas, que contemple quatro modos de transportes (aéreo, rodoviário, ferroviário e hidroviário), que representam as condições médias de transportes na Suíça e na Europa.	tkm*	Europa
(van Lier e Macharis, 2014)	Avaliar os impactos ambientais dos componentes de transportes por hidrovia de interior e determinar sua importância relativa.	Mapear detalhadamente as emissões atmosféricas do transporte por hidrovia de interior para diferentes componentes e determinar sua importância relativa, o foco é a fase de análise de inventário de ciclo de vida (AICV) e, portanto, na construção do inventário de ciclo de vida (ICV) relacionado ao transporte por hidrovia de interior.	Estrutura de modelo de serviço de transporte análoga de Spielmann e Scholz (2005), com foco no transporte de carga por hidrovia de interior.	tkm	Europa
(Bates <i>et al.</i> , 2015)	Avaliar os impactos do ciclo de vida na operação de colocação de materiais dragados de rio	Elaborar um modelo e comparar os impactos ambientais das alternativas de colocação (águas abertas (1), planalto (2) e ilha de contenção (3)). A unidade funcional adotada é a gestão de 100 mil jardas cúbicas de sedimentos não contaminados dragados.	Transporte material sedimentoso para três destinos finais; águas abertas (1), planalto (2) e ilha de contenção (3).	tkm	USA

Autor	Objetivo da Pesquisa	Fase I			Contexto Geográfico
		Objetivo	Escopo	Unidade Funcional	
(Duan <i>et al.</i> , 2015)	Estimar as emissões de carbono do transporte de carga e passageiros em termos de volume de movimentação e rotatividade de passageiros, tipos e frações de veículos e fatores de emissão correspondentes na China.	Quantificar as emissões de CO2 relacionadas às operações de transportes de carga e de passageiro na China, utilizando um método ACV simplificado ( <i>Streamlined LCA</i> ).	Transporte doméstico na China continental de passageiro e carga por meio de rodovias, ferrovias, ar, água e dutos. Incluíram os serviços de transporte público urbano; taxi, ônibus e metro.	tkm ou passageiro-Km	China
(Merchan <i>et al.</i> , 2019)	Determinaram os valores das externalidades negativas relacionadas ao transporte doméstico de cargas (rodoviário, ferroviário e hidroviário) da Bélgica e as converteram em custos externos	A aplicação do método ACV apresenta dois objetivos: (i) comparar os impactos ambientais dos diferentes modos de transporte de carga terrestre; e (ii) analisar os impactos ambientais da divisão modal.	Os componentes de transporte terrestre de carga (rodovia, ferrovia e hidrovia).	tkm	Europa
(Perčić <i>et al.</i> , 2021)	Realizar uma análise técnica, ambiental e econômica de combustíveis alternativos para reduzir a pegada ambiental e os custos de vida útil do transporte hidroviário interior.	Avaliar o impacto ambiental e econômico dos transportes de carga, de passageiro e de serviço (draga e rebocador) por hidrovia de interior	O limite do sistema é definido no sistema de energia, onde as entradas se referem ao total de fontes de energia usadas no ciclo de vida observado de uma configuração do sistema de energia, enquanto a saída representa as emissões associadas a esses estágios do ciclo de vida. Como a ênfase está na comparação dos sistemas de energia, aqui são consideradas apenas as emissões relacionadas às configurações do sistema de energia, e não o casco do navio e outros sistemas do navio.	Energia utilizada no ciclo de vida do sistema de energia (kW)	Europa

Autor	Objetivo da Pesquisa	Fase I			Contexto Geográfico
		Objetivo	Escopo	Unidade Funcional	
(Fan <i>et al.</i> , 2021)	Propor soluções alternativas para o sistema de energia de navios fluviais.	Avaliar o impacto ambiental de sistemas de propulsão com diferentes fontes energéticas para o transporte por hidrovia de interior	Foram consideradas os sistemas de propulsão baseados em três dimensões: tonelagem, distância e condições de navegação, das embarcações de carga (navio graneleiro, navio tanque, navio de container e RO-RO), de passageiro (navio de cruzeiro e ferry), de serviço e de engenharia (draga e navio de salvamento) e de serviço público (navio de resgate marítimo).	Energia utilizada no ciclo de vida do sistema de energia (kW)	China

\* Transporte de uma tonelada em um quilômetro (tkm).



O trabalho de Spielmann e Scholz (2005) é uma referência na aplicação do método ACV em transportes, o qual foi elaborada uma estrutura de Serviços de Transportes genérica, que pode ser aplicada a qualquer modo de transporte. O objetivo do trabalho em questão foi apresentar e discutir uma estrutura genérica de modelo de Serviços de Transportes de cargas, as premissas básicas e os resultados. O escopo contempla as condições médias do setor de transportes de cargas da Suíça e da Europa, que consiste em quatro modos de transportes (aéreo, rodoviário, ferroviário e hidroviário). A unidade funcional adotada é o tkm. Neste trabalho, foram considerados três serviços de transportes: Operação de Transportes, Frota de Veículos e Infraestrutura de Transportes; e são constituídos por sete componentes, a serem descritos a seguir:

**i. Operação de Transporte:**

Neste serviço de transporte, os processos unitários são a viagem do veículo e a pré-combustão, associadas ao componente de transporte *Operação de Veículo* ( $p_1$ ). A unidade de referência adotada é o *vkm* (*Vehicle's Kilometer Performance*), na tradução livre “Desempenho Quilométrico do Veículo”. O dado de entrada utilizado é o consumo de combustível por ton-km, no qual, seus valores estão dispostos na Tabela 2-4.

**ii. Frota de Veículos:**

Este serviço de transporte consiste em três componentes, tendo a unidade de um veículo como a unidade de referência. A seguir são apresentados seus componentes de transporte:

- *Manufatura* ( $p_2$ ): atividades relacionadas à manufatura dos veículos, que consiste na produção dos motores, peças de metal e materiais elétrico, na montagem final e na pintura;
- *Manutenção* ( $p_3$ ): atividades relacionadas à manutenção dos veículos, que consiste nos serviços de garagem e na lavagem do veículo; e
- *Disposição Final* ( $p_4$ ): atividades relacionadas ao descarte dos materiais dos veículos.

### iii. Infraestrutura de Transportes

Este serviço de transporte é composto por três componentes de transportes, que tem duas unidades de referência; um relacionado à construção da via, medido em metro-ano (*ma*), e o outro relacionado à construção das instalações de transportes, medido em área construída no ano ( $m^2$ -ano);

- *Construção* ( $p_5$ ): atividades relacionadas à construção da infraestrutura viária, túneis, pontes, eclusas, entre outros;
- *Operação* ( $p_6$ ): atividades relacionadas à operação e manutenção do modo rodoviário (iluminação e sinalização da via e do controle de ervas daninhas e degelo), do modo ferroviário (consumo de eletricidade e a aplicação de lubrificante para a operação nas estações ferroviárias) e do modo aquaviário (derramamento de óleo (100 kg/ano) e consumo de energia elétrica);
- *Disposição Final* ( $p_7$ ): atividades relacionadas ao descarte dos materiais da infraestrutura.

No Serviço de Infraestrutura de Transportes, os autores consideraram os valores de ocupação total direta do solo para a infraestrutura rodoviária e ferroviária de  $7,8 m^2 a/ma$  e  $21,9 m^2 a/ma$ , respectivamente. Para a infraestrutura hidroviária, a ocupação direta do solo compreende as instalações portuárias ( $5,95E+7 m^2 a/porto$ ) e hidrovias artificiais ( $62 m^2 a/ma$ ).

Para o transporte hidroviário e rodoviário, os autores consideraram os valores relacionados à escavação e ao transporte de resíduos de construção civil, e assumem sua total reutilização e reciclagem. Para infraestrutura ferroviária, os autores contabilizaram apenas o material inerte descartado em aterro. Além disto, os valores de consumo de energia nas viagens dos modos de transportes terrestre adotados neste trabalho constam na Tabela 2-4.

Tabela 2-4: Consumo final de diesel e de energia nas viagens dos modos de transportes

Modo de Transporte	Serviço de Transporte	Cons. Diesel g/tkm	Cons Final de Energia MJ/tkm
Ferroviário	Média RER <sup>4</sup>	2,00	0,23
Rodoviário	16 ton CH <sup>5</sup>	72,00	3,08

<sup>4</sup> RER – Processos que ocorrem na região geográfica da Europa (Ecoinvent, 2023a).

<sup>5</sup> CH – Atividade no que ocorrem na região geográfica da Suíça (Ecoinvent, 2023b).

Modo de Transporte	Serviço de Transporte	Cons. Diesel g/tkm	Cons Final de Energia MJ/tkm
	28 ton CH	50,00	2,14
	40 ton CH	36,00	1,54
	16 ton RER	89,00	3,81
	32 ton RER	38,00	1,63
Hidrovia	Barcaça	9,39	0,38

O Fator de Demanda ( $d_j$ ) é o método para quantificar o consumo de recursos (entradas) necessário ao Transporte ( $P_T$ ). O método para calcular depende do Componente de Serviço de Transporte ( $T$ ) e do modo de transporte.

Nesse trabalho, os autores consideram que os recursos utilizados na Operação de Veículo ( $p_1$ ) – independente do modo de transporte – é calculado por meio da média dos carregamentos ( $vkm/tkm$ ), que consiste no cálculo do quociente entre o desempenho do transporte de veículos ( $vkm$ ) e o momento de transportes ( $tkm$ ).

Os Fatores de Demanda relacionados aos Componentes do Serviço de Frota de Veículos, que compreende a *Manufatura* ( $d_2$ ), a *Manutenção* ( $d_3$ ) e o *Descarte Final* ( $d_4$ ), com  $d_2 = d_3 = d_4$ , são calculados como o inverso do desempenho de transporte durante a vida útil do veículo.

No modo hidroviário, uma barcaça com capacidade de carregamento de mil toneladas, a vida útil adotada pelos autores foi de 1,24 milhão de quilômetros, enquanto no rodoviário, um caminhão de 40 toneladas com capacidade de carregamento de 9,68 tonelada, a vida útil foi de 540 mil quilômetros.

No que se refere ao Serviço de Infraestrutura de Transporte do modo rodoviária, o Fator de Demanda foi calculado considerando o comprimento total das redes de transporte da Suíça e da Europa foi, respectivamente, de 71,1 mil quilômetros e 3,24 milhão de quilômetros. Diante disto, o desempenho total do modo rodoviário da Suíça e da Europeu foi, respectivamente de 56,4 bilhão de vkm e 2,87 trilhão de vkm.

No modo ferroviário, os autores consideraram que uma rede de 2,3 mil quilômetros de vias de mão dupla e o desempenho deste modo de transporte foi de 59,4 bilhão de Gtkm<sup>6</sup> das Ferrovias Federais Suíças.

Os autores fizeram algumas suposições para determinar o Gtkm de um caminhão europeu de 32 ton: peso líquido do veículo é de 18 toneladas; carga média de sete toneladas,

<sup>6</sup> Gtkm: *Gross-tonne kilometre Performance* – tradução livre: Tonelada Bruta por Quilômetro

um peso bruto médio do veículo de 25 toneladas, obtendo uma relação de peso bruta/peso líquida de 3,56 Gtkm/tkm e, portanto, um desempenho de transporte anual de 3,38 trilhão de Gtkm para um caminhão de capacidade de carregamento de 32 toneladas.

Considerando a rede rodoviária da Europeia (incluindo caminhões de 32 toneladas e de 16 toneladas, vans de carga, bem como veículos de passageiros), o valor de desempenho obtido foi de 8,87 trilhão de Gtkm, resultando em uma demanda rodoviária específica de  $3,65E-04$  (ma)/Gtkm. Com base nessas suposições e números, a demanda rodoviária específica para o caminhão com capacidade de carregamento de 32 ton é de  $1,3E-03$  (ma)/tkm.

A demanda total da infraestrutura portuária foi de  $3,18E-09$  unidade/tonelada. A demanda de uma barça, considerando uma distância média de 250 quilômetro, foi de  $1,27E-11$  unidade/tkm, dado pelo somatório do fator de demanda ( $d_j, j = 5,6,7$ ).

Nos resultados, os autores focaram nas emissões de transportes “relevantes”, que compreendem a emissão de gases relacionados às mudanças climáticas, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, emissões de partículas (finas e grossas), emissões de metais pesados (zinco e cádmio) para o solo e ar, bem como DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e uso da terra.

Os autores apresentaram os resultados por meio de uma comparação intramodal e intermodal. Em razão de diferentes magnitudes, os resultados foram normalizados, considerando um serviço de transporte de referência. Ou seja, as emissões de outros serviços de transporte foram expressas em relação ao serviço de transporte de referência.

Nos resultados, os modos ferroviário e hidroviário apresentaram emissão acumulativa consideravelmente menor, com 62% e 92% menos emissões, respectivamente, em relação ao modo rodoviário. O uso do solo é mais impactado pelo modo hidroviário que os demais, devido à construção de um canal artificial.

van Lier e Macharis (2014) avaliaram os impactos ambientais dos Serviços de Transportes do modo hidroviário, determinando a importância relativa dos Serviços de Transporte. Neste trabalho, os autores consideraram a estrutura dos Serviços de Transportes desenvolvidos no trabalho de Spielmann e Scholz (2005). A unidade de medida funcional adotada pelos autores é o *tkm*.

Os autores consideraram nove tipos de barças, categorizadas por faixa de capacidade de carregamento. Os autores utilizaram uma barça de referência, com capacidade é entre 801 e 1,05 mil toneladas (D.E.K. – *Dortmund-Ems Canal*). Nesta, os

autores consideraram tanto as barcaças graneleiras quanto as barcaças-tanques, com capacidade de mil e 1,2 mil toneladas/embarcação, respectivamente.

No que se refere ao Serviço de Infraestrutura de Transporte, os autores consideraram sete hidrovias de diferentes características. A hidrovia de referência foi o Canal *Brussels–Scheldt*, com distância de 27 mil metros, largura média de 55 metros e profundidade média de seis metros. A hidrovia de maior extensão é a *Main-Donau Canal*, com 171 mil metros, 42 metros de largura média e quatro metros de profundidade média. A de menor extensão é o Canal *Roeselare–Leie*, com 16,512 mil metros, 55 metros de largura média e seis metros de profundidade médio. A de menor profundidade foi a *Upper Scheldt*, com 2,5 metros de profundidade, 50,014 mil metros de extensão e 5,3 metros de largura média.

Os Serviços e os Componentes de Transportes são apresentados a seguir.

- **Operação de Barcaças ( $p_1$ ):** compreende os processos unitários relacionados à Viagem de Barcaça e Pré-Combustão, tendo o *vk*m como unidade de medida de referência. A Viagem de Barcaça compreende as emissões geradas pela queima de combustível nas viagens. A Pré-Combustão consiste nas emissões indiretas à Viagem de Barcaças, nomeadamente as que ocorrem durante à extração dos recursos minerais, refino, transportes e armazenamentos, até a disponibilização do combustível no tanque do empurrador (emissões *Well-To-Tank emissions*).
- **Frota de Barcaças:** compreende três Componentes; Manufatura ( $P_2$ ), Manutenção ( $P_3$ ) e Descarte ( $P_4$ ), apresentados a seguir;
  - *Manufatura ( $p_2$ ):* constitui dos processos de fabricação das barcaças, que compreende a produção de motores, peças de metal e cablagem e estampagem. O valor do desempenho das barcaças adotado foi de 738.644.684 tkm para barcaças e 881.119.408 tkm para barcaças-tanque.
  - *Manutenção ( $p_3$ ):* constitui dos processos e recursos utilizados na manutenção da frota de barcaças, dado pelo processo unitário da pintura da frota. Os autores consideraram as informações extraídas da base de dados da *Ecoinvent*, que consiste em dez pinturas no decorrer de 40 anos de vida útil. O principal recurso utilizado na manutenção de uma barcaça é o consumo de 43,6 mil kg de tinta branca alcalina, com 60% de solvente, responsável pela emissão de 123 mil *kgCO<sub>2</sub>* para uma barcaça de capacidade de mil toneladas, além de 16 mil kg de NMVOC.

- *Descarte (p<sub>4</sub>)*: compreende os processos relacionados ao descarte dos recursos da frota de barças.
- **Infraestrutura Hidroviária**: consiste nos Componentes de Construção (p<sub>5</sub>), Operação e Manutenção (p<sub>6</sub>) e Descarte (p<sub>7</sub>), descritos a seguir.
  - *Construção (p<sub>5</sub>)*: é composto pelos processos unitários relacionados à construção de um canal artificial, instalações portuárias, eclusas e pontes. Neste componente, os autores apresentaram duas abordagens: (i) uma abordagem direta a partir do processo unitário “canal” – que consta na base de dados da *Ecoinvent* – e aplicando fatores de emissão de forma proporcional, considerando as dimensões do canal; e (ii) uma abordagem mais refinada por meio de dados específicos, relacionados aos materiais, transporte e energia empreendidos na construção do canal, aplicando fatores de emissão aos subprocessos, tal como, escavação, concretagem, reforço de aço, entre outros. Neste trabalho, os autores afirmam que as características adotadas do canal são do *Main-Donau Canal*, situado na Alemanha, com uma largura de 42 metros (com 10 metros de margem de cada lado do rio para área de tráfego rodoviário). A construção de pontes foi desconsiderada desta avaliação. Os autores afirmam que para construir um metro-ano de canal para uma vida-útil de 118 anos são necessários escavar 4,03 m<sup>3</sup> de terra, 0,31 m<sup>3</sup> de concreto, 8,68 Kg de aço reforçado e 0,0087 Kg de betume.
  - *Manutenção e Operação (p<sub>6</sub>)*: consiste nos processos unitários relacionados à manutenção e operação de eclusas, pontes e ocupação do solo. A eletricidade é o principal recurso empreendido neste Componente, no qual o valor é de 3,42 kWh/metro-ano.
  - *Descarte (p<sub>7</sub>)*: constitui de processos relacionados ao descarte dos materiais da infraestrutura hidroviária.

Os autores consideraram a base de dados da *Ecoinvent*, que apresentou valor de consumo específico e índice de emissão de diesel de 9,39  $g_{diesel}/tkm$  – conforme adotado por Spielmann e Scholz (2005) – e de 3,1 mil  $gCO_2/Kg_{diesel}$ , respectivamente. O cálculo do inventário de ciclo de vida apresentou o valor de 36,9  $gCO_2/tkm$  relacionado às operações de transporte de cargas.

Nos resultados, os autores analisaram a importância relativa dos Componentes de Transporte do modo hidroviário considerando diferentes poluentes, tipo de barça e hidrovia. Na comparação entre os poluentes, observou-se que o  $CO_2$ , CO,  $NO_x$ ,  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  foram expressivos no Componente de Viagem de Barças. Entre os Componentes de Transportes que emitiram  $NO_x$ , o Componente de Viagem de Barças respondeu por 90% do total emitido. O percentual de  $SO_2$  e  $CH_4$  emitidos é significativamente maior na Pré-Combustão. O Componente de Construção do Canal apresentou maior percentual na emissão do  $NH_3$ , enquanto o Componente de Operação e Manutenção da Infraestrutura ( $P_6$ ) apresentou valores de emissão insignificantes.

Na análise das emissões por tipo de barças, as emissões foram menores nas barças de maior capacidade, representando pouco mais de 50% dos poluentes emitidos nos Componentes de Serviços de Transportes. A barça referência (M4), de capacidade entre 801 e 1.050 toneladas, foi a que mais emitiu no Componente de Viagem de Barça, representando quase 70% das emissões.

Entre as hidrovias, o Componente de Pré-Combustão foi predominante em cinco das seis hidrovias avaliadas. Entre essas cinco, o menor percentual de emissão relacionado ao Componente de Pré-Combustão foi observado na hidrovia Albert (CEMT6), com cerca de 30% do total. As emissões do Componente de Operação e Manutenção da Infraestrutura ( $P_6$ ) prevaleceu na hidrovia *Brussel-Scheld* (CEMT6), representando cerca de 40% das emissões.

Bates *et al.* (2015) avaliaram os impactos do ciclo de vida na operação de colocação de materiais dragados de rio. No estudo de caso, os autores consideraram três alternativas de local no EUA: (1) águas abertas (*Open Water*); (2) planalto (*Upland*) e (3) ilha de contenção (*Containment Island*).

O objetivo da aplicação do método ACV foi modelar e comparar os impactos ambientais das alternativas de colocação – (1) águas abertas; (2) planalto; e (3) ilha de contenção. A unidade funcional adotada é a gestão de 100 mil jardas cúbicas de sedimentos não contaminados dragados.

Neste trabalho, os autores utilizaram o método de avaliação IMPACT 2002+ para determinar os Impactos de Pontos Intermediários (*Midpoint Impact*), o método de avaliação ReCiPe, e o método de avaliação *Ecoindicator* 99. Estes métodos permitiram calcular e agregar os Impactos de Ponto Intermediário em pontuações de Impacto de Ponto Final (*Endpoint Impact*), proporcionando uma única métrica nos resultados.

A base de dados considerada foi a *Ecoinvent*, e o valor do consumo específico de combustível adotado foi extraído do trabalho de Spielmann *et al.*, (2007), que é de 9,39  $g_{diesel}/tkm$ . O valor do índice de emissão adotado foi de 3,172 mil  $gCO_2/Kg_{diesel}$ . O cálculo do inventário de ciclo de vida apresentou o valor de 0,0747  $KgCO_2 /tkm$ , que estão relacionados ao transporte de material dragado com destino à água aberta.

Nas conclusões, os autores destacaram a importância do método ACV para determinar os impactos ambientais relacionados à construção das ilhas de contenção, manuseio de materiais, entre outras ações, e não apenas dos Serviço de Transporte.

Duan *et al.*, (2015) elaboraram o método ACV simplificado (*Streamlined LCA*) com o objetivo de quantificar as emissões de  $CO_2$  relacionadas às operações de transportes de carga e de passageiro na China.

O escopo da pesquisa foi o transporte doméstico chinês considerando os modos de transportes rodoviário, ferroviário, aéreo, aquático e dutoviário. Estão inclusos no escopo os serviços de transporte urbano, que incluem taxis, ônibus e metrô. Contudo, os automóveis privados (veículos com menos de dez passageiros) e motocicletas foram excluídos do escopo. Neste trabalho, apenas as emissões de  $CO_2$  de transportes foram avaliadas, tendo a construção da infraestrutura excluída das análises. A unidade funcional adotada é o tkm, para o transporte de carga, enquanto o transporte de passageiros adotou o passageiro-Km.

O método ACV *Streamlined* é uma extensão do método de Atributo de Produto para Algoritmo de Impacto, conhecido pela sigla PAIA, do inglês *Product Attribute to Impact Algorithm*.

No estudo de caso, no contexto do transporte de cargas, considerando os dados gerais de 2012, o transporte por hidrovía foi responsável por 8,178 trilhões de  $tkm$ . Este trabalho não apresentou os valores do consumo específico de combustível e do índice de emissão do  $CO_2$ . O cálculo do inventário de ciclo de vida apresentou o valor de 0,055  $kg CO_2/tkm$  associados às operações de transporte de cargas.

Nas conclusões, os autores chamaram a atenção da necessidade de se ter uma gestão ambientalmente saudável no setor de transporte em razão do contínuo crescimento das emissões de carbono, e sugeriram mudanças radicais nas políticas, visando incentivar a pesquisas para mudanças na estrutura de transportes e combustíveis alternativos.

Merchan *et al.*, (2019) determinaram os valores das externalidades negativas relacionadas ao transporte doméstico de cargas (rodoviário, ferroviário e hidrovía) da



Bélgica e as converteram em custos externos. Os autores aplicaram o método ACV, e utilizaram a base de dados da *Ecoinvent*.

Os autores compararam três categorias de impactos negativos relacionados às mudanças atmosféricas causadas pelo homem: (1) Mudanças Climáticas; (2) Formação de Ozônio Fotoquímico; e (3) Formação de Material Particulado.

Neste trabalho, foram considerados dois objetivos para a aplicação do método ACV: (i) comparar os impactos ambientais dos diferentes modos de transporte de terrestre de carga; e (ii) analisar os impactos ambientais das divisões modais obtidas para o caso belga. A unidade funcional adotada foi o tkm.

Na Fase II do método ACV, os autores consideraram os dados de instituições locais, da *Ecoinvent* v3 e de fontes de literatura. As infraestruturas rodoviária e ferroviária são partilhadas entre o transporte de passageiros e de cargas, tendo os impactos ambientais relacionados à infraestrutura (construção, manutenção e descarte) repartidos de forma proporcional, de acordo com a utilização do transporte de passageiros e de cargas.

Na Fase III, os autores adotaram o modelo de Indicadores de Categorias de Impactos Intermediários (*Midpoint Impact Category Indicators*) e Finais (*Endpoint Impact Category Indicators*), apresentado por Rosenbaum *et al.*, (2018). Para calcular a AICV, adotou-se o método ReCiPe 2008, versão hierárquica (versão V1.22 / Europa), disponível no SimaPro 8.0.5.

O estudo de caso se refere ao ano de 2012. No transporte ferroviário, a fonte energética adotada foi de 86,3% para trens elétricos e 13,7% para trens à diesel, para um total de 368 kJ/tkm de eletricidade e 89 kJ/tkm de diesel. Este modo de transporte foi responsável por movimentar 8,125 bilhão de tkm.

Para o transporte rodoviário, os autores consideraram um total de 72 caminhões, em que as características do veículo, carregamento máximo, consumo de combustível, entre outras informações são apresentados na Tabela 2-5. A distribuição de caminhões por tipo de tecnologia de motor, de acordo com o Padrão Europeu de Emissão é apresentado na Tabela 2-6.

Tabela 2-5: Dados de entrada adotado por Merchan *et al.* (2019) para o modo de transporte rodoviário

<b>Tipo de Caminhão Pesado</b>	<b>Carreg. Máximo (ton/caminhão)</b>	<b>Carreg. Atual – Fator de Carreg. 50% (ton/caminhão)</b>	<b>Cons. Comb. – Fator de Carreg. de 50% (g/tkm)</b>	<b>Partic. Desemp. Transp. de carga (% de tkm)</b>	<b>Contrib. Cons. médio de comb. (g/tkm)</b>
Rígido < 7,5 ton	2	1,01	113	0,65%	0,73
Rígido 7,5-12 ton	5	2,51	61	1,84%	1,13
Rígido 12-14 ton	7	3,51	52	0,24%	0,12
Rígido 14-20 ton	9,7	4,85	37	3,26%	1,22
Rígido 20-26 ton	13,7	6,85	31	4,95%	1,55
Rígido 26-28 ton	16,4	8,19	31	0,03%	0,01
Rígido 28-32 ton	18,4	9,19	27	1,21%	0,33
Rígido > 32 ton	19,7	9,86	25	11,58%	2,95
Articulado 14-20 ton	12,6	6,32	29	0,27%	0,08
Articulado 20-28 ton	17,1	8,54	25	0,20%	0,05
Articulado 28-34 ton	21,5	10,76	23	0,47%	0,11
Articulado 34-40 ton	25,3	12,66	20	75,31%	14,94
Total	-	-	-	100%	23,22

Tabela 2-6: Participação de caminhões por tecnologia de motor

<b>Padrão Europeu de Emissão</b>	<b>Participação de caminhão (%)</b>
Convencional	4%
EURO I	7%
EURO II	19%
EURO III	26%
EURO IV	21%
EURO V	22%

Em razão desta amostra, os autores calcularam o consumo médio de combustível, para um carregamento de 50% da capacidade instalada. O valor adotado foi de 23,22  $g_{Diesel}/tkm$  (ou 994  $kJ/tkm$ ), para um poder caloríficos de 42,8  $MJ/kg_{Diesel}$ . A movimentação de cargas em 2012 atingiu o montante de 32.105 milhões de tkm.

Para o transporte por hidrovia de interior, o consumo médio de diesel adotado foi de 288  $kJ/tkm$ , para uma movimentação de 10,420 bilhões de  $tkm$ . Os valores de consumo específico de combustível e de índice de emissão foram de 9,39  $g_{diesel}/tkm$  e de 3.172  $gCO_2/Kg_{diesel}$ , respectivamente. O cálculo do inventário de ciclo de vida apresentou o valor de 0,0747  $Kg CO_2 Eq./tkm$  associados às operações de transporte de cargas por hidrovia de interior.

A avaliação dos custos externos foi realizada em duas etapas: (i) quantifica o momento de transporte dos modos de transportes; e (ii) é atribuído um valor em Euros, multiplicando-os pelos valores dos custos externos por tkm, conforme Tabela 2-7.

Tabela 2-7: Valor do Custo Externo das Categorias de Impacto Final

<b>Categoria de Impacto Final (Endpoint Impact Category)</b>	<b>Valor do Custo Externo</b>
Mudanças Climáticas	90 €/ton de $CO_2 eq.$
Formação de Oxidante Fotoquímico	3228 €/ton de $NMVOEq.$
Formação de Material Particulado	67,278 €/ton de $PM_{10 eq.}$

Os autores normalizaram os resultados dos cálculos da Análise de Impacto Ambiental pelo modo de transporte que apresentar o maior valor, que neste caso foi o rodoviário. Nas Categorias de Impacto Intermediário, o transporte ferroviário foi o que menos impactou nos três indicadores (Mudanças Climáticas, Formação de Oxidante Fotoquímico e Formação de Material Particulado). Nas Categorias de Impacto Final, o transporte por hidrovia foi o que menos impactou no indicador de Dano à Disponibilidade de Recursos.

Em uma análise dos Indicadores de Categoria de Impacto Intermediário, os Serviços de Infraestrutura Hidroviária foram responsáveis por 64% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 27% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 50% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado. Por outro lado, os Serviços de Operação de Transporte representaram 29% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 64% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 42% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado.

Para os Indicadores de Categoria de Impacto Final, os Serviços de Infraestrutura Hidroviária foram responsáveis por 62% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana, 70% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema e 57% das emissões relacionadas ao Dano à Disponibilidade de Recursos. Os Serviços de Operação de Transporte responderam por 31% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana e 22% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema. O Componente de Pré-Combustão foi responsável por 40% das emissões relacionadas ao Dano à Disponibilidade de Recursos.

No transporte ferroviário, o Componente de Pré-Combustão (geração de eletricidade) foi responsável por 50% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 18% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 19% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado. Os Serviços de Infraestrutura Ferroviária responderam por 25% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 29% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 35% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado. Os Serviços de Operação de Transporte responderam por 10% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 41% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 26% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado.

Para os Indicadores de Categoria de Impacto Final, o Componente de Pré-Combustão (geração de eletricidade) respondeu por 39% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana, 46% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema e 42% das emissões relacionadas ao Dano à Disponibilidade de Recursos. De forma similar, os Serviços de Infraestrutura Ferroviária responderam por 31% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana, 32% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema e 32% das emissões relacionadas ao Dano à Disponibilidade de Recursos. Os Serviços de Operação de Transporte apresentaram baixo percentual de emissão, com 13% das emissões

relacionadas ao Dano à Saúde Humana e 8% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema.

Por fim, os Serviços de Operação de Transporte do modo rodoviário responderam por 66% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 67% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 58% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado. Os Serviços de Infraestrutura Rodoviária responderam por 13% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 18% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 22% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado. A Pré-Combustão (produção de combustível) respondeu por 13% das emissões relacionadas às Mudanças Climáticas, 10% das emissões relacionadas à Formação de Oxidante Fotoquímico e 12% das emissões relacionadas à Formação de Material Particulado.

Para os Indicadores de Categoria de Impacto Final do modo rodoviário, os Serviços de Operação de Transporte responderam por 63% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana e 50% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema. De forma similar, os Serviços de Infraestrutura Rodoviária responderam por 16% das emissões relacionadas ao Dano à Saúde Humana, 28% das emissões relacionadas ao Dano à Diversidade do Ecossistema e 20% das emissões relacionadas ao Dano à Disponibilidade de Recursos. O Componente de Pré-Combustão apresentou baixo percentual de emissão relacionado ao Dano à Saúde Humana e à Diversidade do Ecossistema com 12% e 15%, respectivamente. Contudo, para o Dano à Disponibilidade de Recursos, o Componente de Pré-Combustão respondeu por 70% das emissões.

Nas conclusões, os autores enfatizaram o quão nocivo o modo rodoviário é ao meio ambiente, quando comparado com os demais modos de transportes. Isto ocorre em razão dos Serviços de Operação de Transportes. No modo ferroviário, o maior impacto ambiental ocorreu no Componente de Pré-Combustão. No modo hidroviário, o maior impacto ambiental ocorreu no Serviço de Infraestrutura Hidroviária, devido à construção do canal artificial.

Perčić *et al.*, (2021) avaliaram o impacto ambiental e econômico dos transportes de carga, passageiro e trabalho (draga e rebocador), empregando diferentes fontes energéticas classificadas como de baixo carbono (eletricidade, metanol, Gás Natural Liquefeito (GNL), hidrogênio, amônia e biodiesel).

Segundo os autores, o método ACV é um dos métodos “preferidos” para análise de impacto ambiental. O objetivo de sua aplicação neste trabalho é o de determinar as emissões de GEE ( $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2O$ ) das operações de transporte de diferentes fontes de energia consideradas de baixo carbono.

Neste trabalho, o *software* GREET 2019 foi adotado nos cálculos de emissão, considerando os processos entre a extração de recursos naturais e o consumo do combustível (*Well-To-Wake* – WTW). Além disto, os autores consideraram nos cálculos de emissão, os poluentes liberados na fabricação de seus elementos-chaves.

Na Análise de Ciclo de Vida do sistema de propulsão à diesel, os autores incluíram os processos relacionados à recuperação do petróleo e seu transporte até a refinaria, processo de refino e seu transporte até a bomba de combustível (WTP – *Well-To-Pump*) e os processos relacionados à queima do diesel nos motores dos empurradores (PTW – *Pump-To-Wake*).

Para o sistema de propulsão à bateria elétrica, os processos relacionados à manufatura da bateria, geração de eletricidade (WTP) e o consumo na operação de transporte (PTW) foram considerados.

O sistema de propulsão à metanol consiste no uso de 95% de metanol e 5% de diesel. Diante disto, foram considerados os processos de ambas as fontes de energia. Os processos relacionados ao metanol são; recuperação do gás natural, produção e transporte até as bombas de combustível. A produção do metanol ocorre em uma planta industrial situada no Egito, pelo qual é transportado por meio de navios-tanques até a Croácia, um trajeto de três mil Km. Ao chegar em solo croata, este produto é transportado por caminhão-tanque até as bombas de combustível.

Outra fonte de energia utilizada foi o Gás Natural Liquefeito (GNL) em um motor bi-combustível, com diesel como combustível-piloto a 1%. Para uma carga de 75%, o consumo específico de GNL é de 154,4 g/kWh, enquanto o consumo específico de combustível-piloto é de 1,8 g/kWh.

No GNL, a fase do WTP compreende os processos relacionados à recuperação do gás natural, sua liquefação e transporte. Os autores assumiram que o GNL foi transportado do Qatar para a Croácia, um trajeto de sete mil Km por navios-tanque e depois por caminhão-tanque, cuja distância corresponde ao do transporte do diesel.

Os fatores de emissão para o  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2O$ , relacionados à queima do diesel, GNL e metanol estão dispostos na Tabela 2-8. Observa-se a elevada quantidade de  $CO_2$  emitido pela queima das fontes energéticas nos motores, previsto na Tabela 2-8.

Tabela 2-8: Fatores de emissão do diesel, GNL e Metanol adotado pelos autores

GHG	GWP	Fator de Emissão, FE (g/kg combustível)		
		Diesel	GLN	Metanol
$CO_2$	1	3.206	2.750	1.380
$CH_4$	25	0,06	51,2	-
$N_2O$	298	0,15	0,11	-

As células de combustível a hidrogênio são utilizadas na propulsão das embarcações, com a energia elétrica gerada por meio de reações eletroquímicas. O hidrogênio alimenta uma célula de combustível de Membrana de Trocadora de Prótons (*Proton Exchange Membrane* – PEM). As características desse tipo de tecnologia são a baixa temperatura de operação (65 – 85 °C) e a necessidade de hidrogênio puro como combustível, devido à sua intolerância a impurezas. O poder calorífico líquido do hidrogênio adotado foi de 33,3 kWh/kg.

O ciclo de vida de uma célula de combustível a hidrogênio inclui o processo de fabricação de uma célula de combustível, recuperação de gás natural, produção de hidrogênio e sua liquefação, sua distribuição por caminhões-tanque e operação de transporte, o qual não há emissões de escapamento.

Os autores consideraram a produção do hidrogênio a partir da produção do gás natural produzido na Europa Ocidental e, após a sua produção e liquefação, é transportado para a Croácia em caminhões-tanques. O hidrogênio permite uma autonomia de 1,2 mil Km para os cargueiros, 1,3 mil Km para as embarcações de passageiros e 1,45 mil Km para as dragas.

A amônia é um combustível rico em hidrogênio. Uma infraestrutura bem estabelecida e a falta de conteúdo de carbono na amônia o tornam uma opção promissora para o setor de navegação. Neste trabalho, a amônia é considerada como um transportador de hidrogênio. A amônia precisa ser processada por meio de um *cracker*, pelo qual ocorre a decomposição da amônia em hidrogênio e nitrogênio, e então o hidrogênio é purificado, em razão da já mencionada intolerância à impureza das células de combustível PEM. A eficiência do *cracker* é de 80%, e o processo de purificação é de 90%. O poder calorífico líquido adotado foi de 5,18 kWh/Kg.

O ciclo de vida da amônia inclui os processos relacionados à fabricação de uma célula de combustível, recuperação de gás natural, produção de amônia e sua distribuição por caminhões-tanque. Não há emissões de gases durante a operação do navio.

Por fim, os autores empregaram o biodiesel B20, produzido a partir da soja. O ciclo de vida desta fonte energética constitui de processos relacionados ao cultivo da soja e extração do óleo de soja, transporte do óleo de soja por caminhões-tanque até a usina de transesterificação, um trajeto de 50 km. Após a produção, o biodiesel é transportado para uma estação de reabastecimento onde há biodiesel e diesel são misturados, gerando o biodiesel B20. Neste contexto os processos relacionados ao diesel foram considerados. A autonomia das embarcações é diferente, com 450 km para os navios de carga, 550 km para os navios de passageiros e 700 km para as dragas.

O estudo de caso foi na rede hidroviária de interior da Croácia, com um trajeto de 223 km e embarcação de capacidade de 987 toneladas. Os autores adotaram a base de dados da *Ecoinvent*, com os valores empregados para consumo específico de combustível de 11,38  $g_{diesel}/tkm$  e índice de emissão de 3206  $gCO_2/Kg_{diesel}$ . O cálculo do inventário de ciclo de vida do Serviço de Operação de Transporte de carga foi de 0,088  $KgCO_2 eq./tkm$ .

Nas conclusões, os autores observaram que a solução de descarbonização mais ecológica é uma embarcação movida a eletricidade, que envolve a substituição dos propulsores movidos à diesel para os movidos a baterias de íon-lítio. Tal substituição permite uma redução da pegada de carbono em 36% para o navio de carga, 51% para o de passageiros e 40% para a draga.

Fan *et al.*, (2021) aplicaram o método ACV e ACCV para estimar as emissões e os custos do ciclo de vida de duas embarcações: (1) um navio movido a bateria no canal; e (2) um navio híbrido no rio *Yangtze*. O navio movido a bateria tem uma capacidade de 64 TEU, com uma viagem única de 250 km. Contudo, tal embarcação contém dois motores a diesel de 140 kW para garantir a manobrabilidade. O consumo específico adotado considerou de duas fontes energéticas, o valor de 215 g/kWh e um fator de emissão de 3.206  $kgCO_2/kg$ .

Nesta embarcação, foi considerado o ciclo de vida dos sistemas de propulsão movidos a diesel e a bateria. O ciclo de vida de motores a diesel inclui os processos relacionados à fabricação do motor, à recuperação de petróleo bruto e seu transporte até a refinaria, o refino do diesel e seu transporte até a bomba de combustível, e as emissões relacionadas ao consumo de diesel na operação de transporte.

O ciclo de vida do sistema de propulsão movido a bateria inclui os processos relacionados à geração de energia elétrica, pela fabricação das baterias de lítio (lítio-íon). Esta fonte de energia não gera emissão na operação de transporte.



Por outro lado, as embarcações que operam no rio *Yangtze* tem a capacidade de 6,7 mil toneladas. A embarcação tem dois sistemas de propulsão movidos a diesel de capacidade instalada de 735 kW, sendo utilizada apenas 441 kW. Para substituir o diesel, foram utilizados dois geradores de GNL, uma bateria e duas caixas de engrenagem. Segundo os autores, o sistema de propulsão movido a GNL e a bateria suportam 90% e 10% da potência de navegação. A vida útil do navio é de 30 anos e distância percorrida em um é de até 28.788 km.

O ciclo de vida do navio híbrido consiste em processos relacionados ao GNL, mas também à bateria. Portanto, os processos incluídos na avaliação são os processos de fabricação do sistema de propulsão movidos a GNL e a bateria, que inclui os processos relacionados ao WTP do GNL, que inclui à extração de gás natural, seu transporte para usina de liquefação e transporte do GNL para o armazenamento; do WTP da eletricidade, dado pela geração de eletricidade; e emissões de PTW liberadas pela operação do navio. O consumo de energia do navio híbrido é considerado igual ao do navio fluvial movido a diesel, ou seja, 23,84 kWh/km. Assim, os consumos energéticos dos sistemas de propulsão movidos a GNL e a bateria são de 21,46 e 2,38 kWh/km, respectivamente.

O consumo específico de combustível considerado foi de 2,73  $gCO_2/tkm$ , e um índice de emissão de 3206  $gCO_2/Kg_{diesel}$ . O cálculo do inventário de ciclo de vida apresentou o valor de 8,70  $gCO_2_{eq}/tkm$  associado às operações de transportes de cargas utilizando o diesel.

Nas conclusões, os autores destacaram que a energia da bateria e a energia híbrida têm menores emissões de  $CO_2$  e custos durante o ciclo de vida, na qual as emissões totais e os custos são reduzidos em 14,5% e 17,78%, respectivamente no navio de 67 TEU, e os do navio cargueiro de 6.700 toneladas são reduzidos em 33,44% e 39,15%, respectivamente.

A Tabela 2-9 consolida as informações extraídas dos trabalhos científicos, tal como, os valores de entradas e saídas, os dados da operação de barças e o contexto geográfico da operação de transporte.

As entradas consideradas foram os Índices de Emissão ( $gCO_2/Kg_{Diesel}$ ) e o Consumo Específico de Combustível ( $g_{Diesel}/tkm$ ). No primeiro, adotou-se o valor observado nos trabalhos de Spielmann e Scholz (2005), Bates *et al.*, (2015) e Merchan *et al.*, (2019) por apresentar característica de capacidade similar aos utilizados neste trabalho. O valor do consumo específico de combustível foi calculado a partir de dados operacionais

identificados nos relatórios técnicos, produzidos por instituições vinculadas ao Governo do Brasil.

Nas saídas, a viagem de barcaças esteve presente em todos os trabalhos identificados no levantamento da literatura científica. Apenas dois trabalhos determinaram as emissões em todos os Componentes de Serviços de Transportes, que foram, Spielmann e Scholtz (2005), van Lier e Macharis (2014) e Merchan *et al.*, (2019).

Em nenhum desses trabalhos, foi considerado o impacto da variação hidrológica no ciclo de vida do transporte de grãos por hidrovia de interior. No caso do rio Madeira, objeto desta tese, a variação de nível d'água tem impactos significativos na operação de transporte, em especial no período de seca quando o nível d'água fica baixo. A Tabela 2-9 expõe os valores utilizados nos trabalhos da revisão de literatura.

Tabela 2-9: Valores de consumo específica de diesel, índice de emissão e emissão de  $CO_2$  dos Componentes de Serviços de transportes

Autores	Dados de Entrada				Dados de Saída							País
	Capac. de Barcaças <i>Tonelada Barcaça</i>	Distância (Km)	Índice Emissão $\frac{g CO_2}{Kg Diesel}$	Cons. Espec. Comb. $\frac{g Diesel}{tkm}$	Operação de Transporte		Frota de Barcaças		Infraestrutura Hidroviária		Emissão Total	
					Viagem de Barcaças	Pré-Combustão	Manuf.	Manutenção	Const.	Operação & Manutenção		
(Spielmann and Scholz, 2005)	1000	250	3172	9,00	74,7	7,97	1,99	0,498	13,9	0,498	99,6	Suíça
(van Lier and Macharis, 2014)	1050	27	3100	9,39	36,9	10,8	0,967	0,139	6,07	0,197	55,1	Bélgica (Flanders)
(Bates et al., 2015)	1000	16,0934	3172	9,00	74,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	74,7	EUA
(Duan et al., 2015)	1000	N/A	N/A	N/A	55,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	55,0	China
(Merchan et al., 2019)	1000	1417	3172	9,39	21,7	3,74	1,49		47,8		74,7	Bélgica
(Perčić et al., 2021)	967	223	3206	11,38	88,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	88,0	China
(Fan et al., 2021)	1880	6000	3206	2,73	8,70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	87,0	China

## 2.6 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi apresentar a revisão de literatura sobre a aplicação do método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no transporte de cargas por hidrovia de interior. Foram identificados estudos relevantes, com destaque os trabalhos de Spielmann e Scholz (2005), van Lier e Macharis (2014), Merchan et al. (2019), entre outros, que contribuíram para a compreensão dos impactos ambientais associados aos diferentes modos de transporte. A seguir, são destacados os principais achados e as oportunidades de pesquisa identificadas.

A partir dos estudos de Spielmann e Scholz (2005) e van Lier e Macharis (2014) foi possível constatar o menor impacto ambiental do THI, em termos proporcionais, quando comparado com os demais modos de transporte, considerando como métrica as emissões de  $CO_2$  e outros poluentes. No entanto, a Construção de Infraestrutura – em especial a construção de canais artificiais e das instalações portuárias –, tem impacto maior no uso do solo e em alguns tipos de emissões, como o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ).

A eficiência energética do THI é tratada no trabalho de Merchan et al. (2019), no qual constata-se um consumo de combustível menor quando comparado com os demais modos de transporte (ferroviário e rodoviário), sendo uma vantagem competitiva deste modo de transporte em relação aos demais.

A revisão identificou que, embora o THI tenha uma pegada ecológica reduzida durante a operação, os impactos relacionados ao Serviço de Infraestrutura de Transporte – em especial os Componentes de Construção e Manutenção de Infraestrutura, como canais e instalações portuárias – são significativas. Bates et al. (2015) e van Lier e Macharis (2014) destacam que os Componentes de Construção e Manutenção de Infraestrutura (construção de canais artificiais e de dragagem) são um dos principais impactos ambientais devido ao elevado consumo recursos (concreto, aço e combustível).

Perčić et al. (2021) e Fan et al. (2021) exploraram a adoção de fontes energéticas de baixo carbono, como o GNL, hidrogênio e amônia, e sistemas de propulsão híbridos ou totalmente elétricos como soluções viáveis para a redução das emissões de poluentes nas operações de transporte do THI. Tais avanços tecnológicos representam uma tendência crescente no setor, com potencial para reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência energética.

Os capítulos a seguir tratam do procedimento metodológico adotado nesta tese, detalhados na forma das fases do método ACV.

### **3 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO DA ACV**

O procedimento metodológico adotado nesta tese seguiu a estrutura do método de Análise de Ciclo de Vida (ACV), que compreende quatro fases: (1) Fase I: Definição de Objetivo e Escopo; (2) Fase II: Análise de Inventário; (3) Fase III: Avaliação do Impacto; e (4) Interpretação, detalhado a seguir.

#### **3.1 Definição de Objetivo da ACV**

Conforme já mencionado, as mudanças climáticas tem se tornado uma das principais causas de interrupções do modo hidroviário (Kievits, 2019), com a piora da navegabilidade como uma de suas principais consequências. Neste contexto, o que se pretende com esta aplicação é quantificar o impacto ambiental da variação hidrológica no transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira.

#### **3.2 Definição de Escopo da ACV**

A definição do escopo tem o objetivo de definir, de forma detalhado, o sistema de produto, que nesta tese é a hidrovia do rio Madeira, conforme a seguir.

##### **3.2.1 Fronteira do Sistema**

###### *3.2.1.1 Hidrovia do rio Madeira*

A escolha do rio Madeira foi devido à sua importância na cadeia logística de exportação de grãos do país, produzidos na região do Centro-Oeste, que utilizam os portos marítimos situados na região norte do país, conhecidos por Arco Norte (Brasil, 2017a).

A escolha dos grãos (soja e milho) foi em razão da importância da cadeia logística da soja e milho para o país. Na safra 2022/23, o Brasil produziu um total de 295,591 milhões de toneladas de grãos<sup>7</sup>, que compreendem algodão (caroço), amendoim, arroz, aveia, canola, centeio, cevada, feijão, gergelim, girassol, mamona, milho, soja, sorgo, trigo e triticale (Brasil, 2024a). Entre essas culturas, a soja representou 48,34% (146,858 milhões de

---

<sup>7</sup> Apesar do termo “grãos” se referir às estas culturas (algodão (caroço), amendoim, arroz, aveia, canola, centeio, cevada, feijão, gergelim, girassol, mamona, milho, soja, sorgo, trigo e triticale), nesta tese, o termo “grãos” será utilizado para denotar, apenas, a soja e o milho.

toneladas) e o milho 41,24% (112,752 milhões de toneladas), representando, juntas, um total de 89,58% do total de grãos produzidos no país.

O principal polo produtor de grãos (soja e milho) no Brasil situa-se no estado do Mato Grosso (MT), localizado na região Centro-Oeste do país. Do total produzido neste Estado, a soja representou 29,49% (37,567 milhões de toneladas) e o milho 38,85% (42,974 milhões de toneladas) (Brasil, 2024a).

As exportações dos grãos somaram 101,869 milhões de toneladas de soja, representando 69,37% da safra 2022/23, o que rendeu um montante de US\$ 53,244 bilhões de divisas para o país. No caso do milho, as exportações somaram 55,898 milhões de toneladas, representando 42,38% do total de milho produzido, o que rendeu um montante de US\$ 13,613 bilhões de divisas para o país (Brasil, 2024b).

Para escoar a produção de grãos, o Mato Grosso conta com uma vasta malha rodoviária e ferroviária, que conecta com todas as regiões do país. Contudo, nesta tese, a rota adotada para escoar a produção de grãos foi por meio do Eixo Madeira, do Corredor Logístico Estratégico Norte, conforme consta na Figura 3-1.

A origem dos grãos adotada nesta tese é na cidade de Sorriso (MT) por ser o maior produtor desta *commodity* do estado. A cidade em questão é situada ao norte de Cuiabá (MT), capital do Estado, que utiliza o modo rodoviário até a cidade de Porto Velho (RO), uma distância aproximada de 1.435 km, local em que é realizado um transbordo para o modo hidroviário. O embarque e o desembarque ocorrem nos terminais da Hermasa, sendo um localizado na cidade de Porto Velho, no estado de Rondônia, e outro localizado na cidade de Itacoatiara, no estado do Amazonas, uma distância de 1.080 km.

Ressalta-se que o objeto desta tese consiste na operação de transporte por hidrovias de interior, sendo desconsiderado o transporte entre a cidade de Sorriso/MT e Porto Velho/RO, por meio do modo rodoviário, e das operações de transportes marítimo de longo curso.

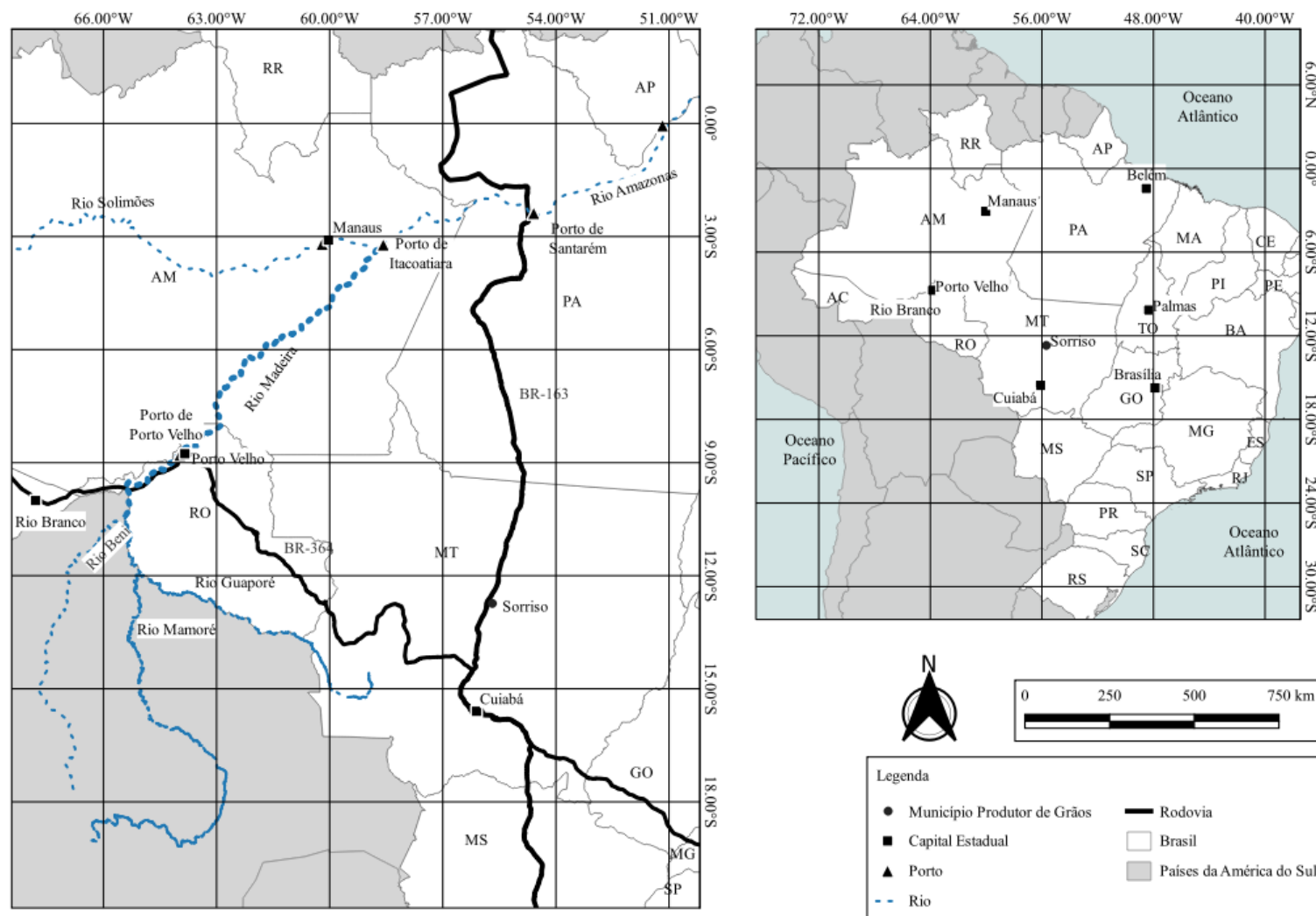


Figura 3-1: Rota para escoar à produção de soja do MT para exportação utilizando os portos do Arco Norte

A seguir é apresentado os Serviços de Transportes identificados no modo hidroviário.

### 3.2.1.2 Serviços de Transportes

Nesta tese, foram considerados nos Serviços de Transportes os estágios do ciclo de vida, previsto na ABNT (2009b), tais como: extração e aquisição de matéria-prima, por meio da produção de energia e materiais, manufatura, uso tratamento de fim de vida até sua disposição final.

Os serviços de transportes adotados nesta tese foram identificados na literatura científica e constam na Figura 3-2.

- i. **Infraestrutura Hidroviária:** consiste nas emissões geradas na Construção ( $P_5$ ), na Manutenção ( $P_6$ ) e na Disposição Final ( $P_7$ ) do canal hidroviário e das instalações portuárias, incluindo pontes e eclusas. O rio Madeira é uma hidrovia natural, e não há eclusas ou pontes de travessia (rodoviária ou ferroviária) no trajeto entre o porto de Porto Velho (RO) e o porto de Itacoatiara (AM). No que se refere ao Componente de Serviço de Transporte Construção ( $P_5$ ), considerou-se as emissões geradas no processo construtivo das instalações portuárias, que são os portos de Porto Velho e Itacoatiara. O Componente de Serviço de Transporte de Operação & Manutenção ( $P_6$ ) é referente às emissões geradas na dragagem do canal hidroviário, que ocorre todos os anos devido ao elevado acúmulo de sedimentos ao longo do rio. A Disposição Final ( $P_7$ ) foi desconsiderada do escopo deste trabalho em razão da ausência de dados e informações para sua mensuração.
- ii. **Frota de Embarcações:** consiste nas emissões geradas na Manufatura ( $P_2$ ), na Manutenção ( $P_3$ ) e no Destino Final ( $P_4$ ) das embarcações utilizadas nas operações de transportes. A Manufatura ( $P_2$ ) compreende as emissões geradas no processo de produção do sistema de propulsão (motores), das partes metálicas e materiais elétricos, da montagem e da pintura. A Manutenção ( $P_3$ ) compreende as emissões geradas durante a pintura da frota, que ocorre em tempos determinados. A Disposição Final ( $P_4$ ) não foi considerada por falta de dados e informações para sua mensuração.



- iii. **Operação de Transporte ( $P_1$ ):** consiste nas emissões geradas na Pré-Combustão – que compreende as emissões indiretas associadas ao uso operacional das barcaças, que ocorrem durante a exploração, refino, transporte e armazenagem de combustíveis utilizados durante a viagem das barcaças (*well-to-tank*) – e na Viagem das Embarcações – que consiste nas emissões geradas pela queima de combustível nos motores dos empurradores nas viagens (*tank-to-propeller emission*).

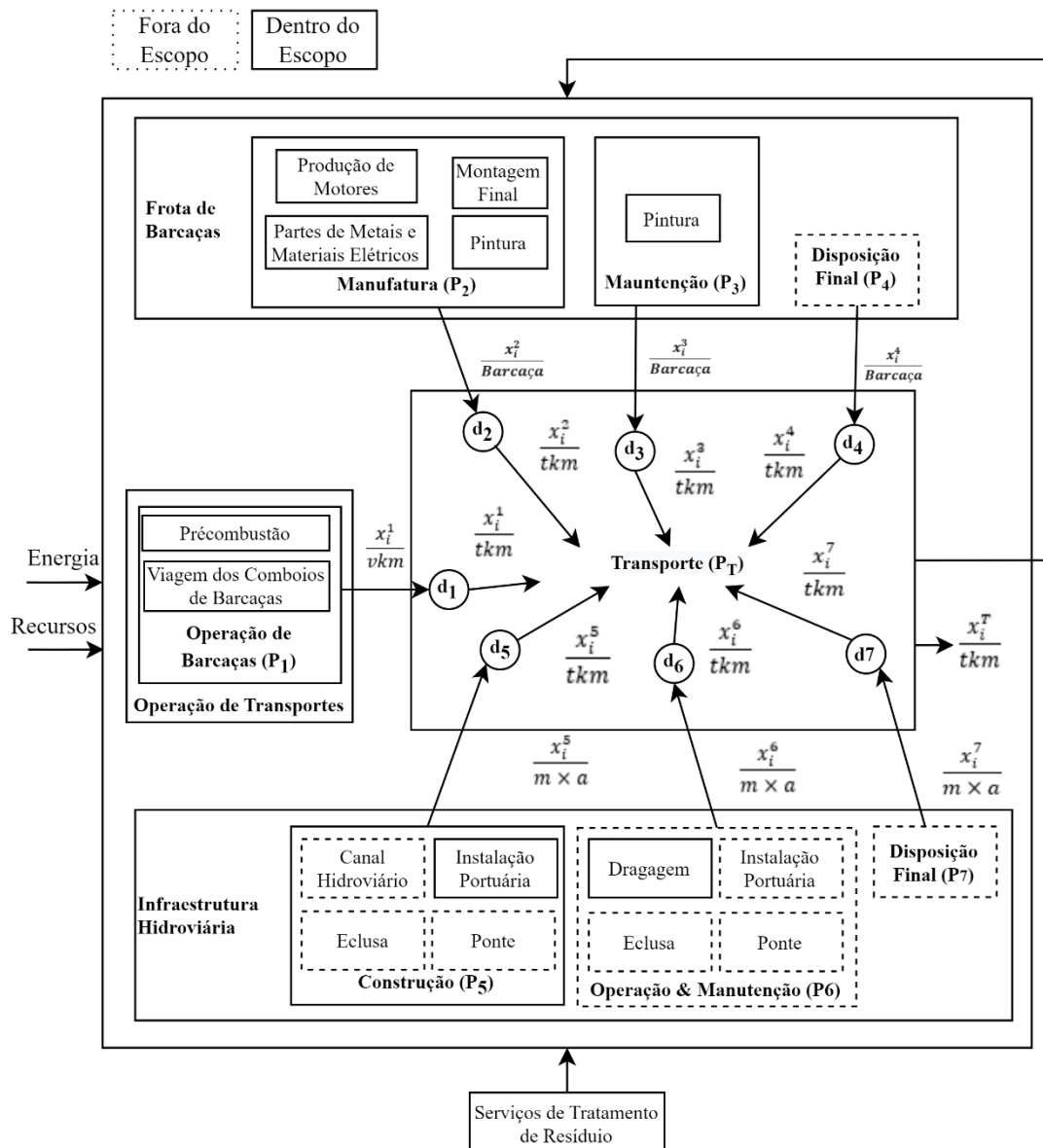


Figura 3-2: Serviços de Transporte por Hidrovia de Interior Adotados nesta Tese  
 Fonte: Adaptado de (Merchan *et al.*, 2019; Spielmann *et al.*, 2007)

A memória de cálculo dos Componentes de Serviços de Transportes consta no Capítulo 4 (Análise de Inventário).

### 3.3 Unidade Funcional

A partir do levantamento bibliográfico do capítulo 2 (Análise de Ciclo de Vida (ACV)), percebe-se o uso predominante da tonelada-quilômetro (tkm) como unidade funcional, conforme a seguir:

1. **Adoção de tkm para Modelagem de Impactos Ambientais e Econômicos no Transporte de Carga:** Spielmann e Scholz (2005), van Lier e Macharis (2014), e Merchan et al. (2019), utilizaram o momento de transporte (tkm) para analisar e mensurar os impactos ambientais de diferentes modos no transporte de cargas. O uso desta unidade de medida facilita a comparação entre outros modos de transportes (rodoviário, ferroviário e hidroviário), permitindo uma avaliação mais precisa das eficiências ambiental e econômica entre esses modos de transportes.
2. **Versatilidade para Diferentes Contextos Geográficos e Modos de Transporte:** A unidade funcional tkm foi usada em estudos com diferentes contextos geográficos, como na Bélgica (Merchan *et al.*, 2019), na China (Duan *et al.*, 2015), nos EUA (Bates *et al.*, 2015), entre outros. Isso sugere que o tkm é uma unidade de medida padronizada e adaptável às realidades diversas existentes, o que facilita a comparação entre diferentes regiões e sistemas de transporte.
3. **Comparação com Outras Unidades Funcionais:** Ao observar as alternativas de unidades funcionais, como o uso de kW (Fan *et al.*, 2021; Perčić *et al.*, 2021) para estudos de sistemas energéticos de embarcações, nota-se que o foco dessas pesquisas está nas emissões associadas à energia utilizada no ciclo de vida de sistemas de propulsão e combustíveis, mais apropriadas para abordagens que privilegiam uma análise energética detalhada do ciclo de vida do sistema de propulsão específico. O tkm, por sua vez, é mais adequado quando o foco é o transporte de carga e a distância percorrida, sendo uma unidade funcional que representa melhor a logística e o impacto do transporte em um contexto mais amplo.

Portanto, o uso da unidade funcional tkm nesta tese é justificado por sua relevância em estudos que utilizam o método ACV para avaliar o impacto ambiental de

transporte de carga e sua adequação em estudos comparativos entre diferentes modos de transportes e regiões geográficas distintas.

A seguir é descrito o método de cálculo para o comportamento do nível d'água.

### **3.4 Comportamento Hidrológico do Rio Madeira**

O levantamento da série histórica dos dados hidrológicos do rio permite identificar os períodos de seca e cheia, assim como o a amplitude e o comportamento da curva de nível.

Nesta tese, os dados de nível d'água foram extraídos do sistema Hidroweb v.3.2.6, uma base de dados vinculada à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), agência reguladora dedicada à fiscalização do cumprimento da Lei das Águas do Brasil (Lei nº 9.433/1997) e do marco legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) (Brasil, 2023a).

No caso do rio Madeira, adotou-se a estação hidrológica do porto de Porto Velho/RO (15400000), tendo como justificativa a sua utilizada pela Marinha do Brasil na tomada de decisão para salvaguardar a população e a navegação. O período de dados adotado foi entre 2013 e 2023, uma série histórica de dez anos, trazendo maior confiabilidade na determinação do comportamento médio do nível d'água.

O *Hidroweb* apresenta dados de nível d'água (em metros), volume de chuvas (em milímetros) e vazão d'água (em  $m^3/s$ ), com registro a cada 15 minutos. Em razão do elevado volume de dados, o *Hidroweb* permite a extração de dados de no máximo 90 dias, disponíveis na extensão de arquivo texto simples, sem formatação (.TXT) ou em arquivo de texto que armazena dados em formato de tabela estruturado, separando as informações por vírgulas (.CSV).

No levantamento dos dados hidrológicos para esta pesquisa, foi necessário elaborar um método de correção dos dados, descritos a seguir.

#### **3.4.1 Ajustar Base de Dados**

Nesta tese, os dados hidrológicos foram extraídos por meio de arquivos .CSV e tabulados em planilha eletrônica. Foram observadas vacâncias de dados e, em alguns casos, a supressão de casas decimais.

No que tange à vacância de dados, a solução foi calcular primeiro a Taxa de Variação no Intervalo de Tempo  $i$  ( $Tx_i$ ), dado pela Equação 3-1. A partir disto, é calculado o Valor Esperado no Intervalo de Tempo  $i$  ( $VE_i$ ), dado pela Equação 3-2.

$$Tx_i = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \times \frac{1}{(n_i + 1)} \quad \text{Equação 3-1}$$

$$VE_i = V_1 \times (1 + Tx_i \times n_i) \quad \text{Equação 3-2}$$

Onde,

$V_1$  – último dado antes de um intervalo sem dados;

$V_2$  – primeiro dado após um intervalo sem dado(s);

$n$  – Intervalos de tempo sem dados;

$i$  – Tempo (1, 2, ...,  $n - 1$ ).

Após o tratamento dos dados, foi elaborado um relatório contendo a média de nível d'água no intervalo de tempo de interesse, sendo plotados em um gráfico, o que permite formar a curva de nível d'água. A partir disto, é possível identificar os períodos de cheia e seca.

A seguir, é apresentado o método adotado para identificar o trecho gargalo da hidrovia, o que leva a restrições à navegação.

### 3.5 Trecho Crítico à Navegação

A identificação do trecho crítico à navegação é informação importante, com impactos na capacidade de carregamento dos comboios de barcaças. A seca do rio Madeira é o período em que surgem obstáculos à navegação, tais como, estreitamento de margens, redução de profundidade, formação de bancos de areia, afloramentos rochosos, entre outros (Brasil e USACE, 2019)

No rio Madeira, a Capitania Fluvial de Porto Velho (CFPV), instituição subordinada ao Comando do 9º Distrito Naval da Marinha do Brasil (Brasil, 2023b), responsável pelas atividades relativas à Marinha Mercante e organizações correlatas quanto “à salvaguarda da vida humana e à segurança da navegação nas hidrovias

interiores” (Brasil, 2023c), entre outras atividades, proíbe a navegação para o nível d’água abaixo de três metros e meio.

Para até quatro metros, a navegação é proibida no período noturno e no trecho entre Porto Velho e Calama e na Passagem do Pedral dos Marmelos (Figura 3-3), situado entre os municípios de Humaitá (AM) e Manicoré (AM), com restrição de calado em até 2,3 metros (Brasil, 2018a).

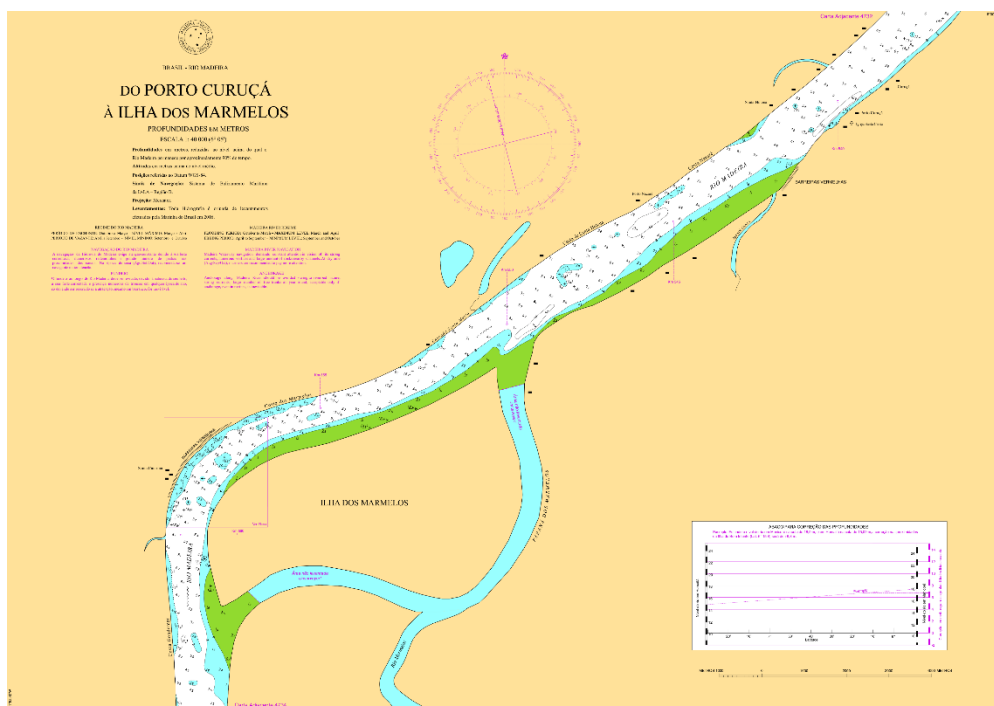


Figura 3-3: Trecho crítico na Passagem do Pedral dos Marmelos do rio Madeira

A seguir é apresentado o método desenvolvido para a formação dos comboios de barcaças a partir do nível d’água.

### 3.6 Formação de Comboio de Barcaças

No rio Madeira, os comboios de barcaças são formados a partir do nível d’água medido na régua do porto de Porto Velho/RO. Os critérios identificados na literatura estão sintetizados na Figura 3-4. Conforme já mencionado, a Marinha do Brasil proíbe a navegação para o nível d’água abaixo de três metros e meio de profundidade.

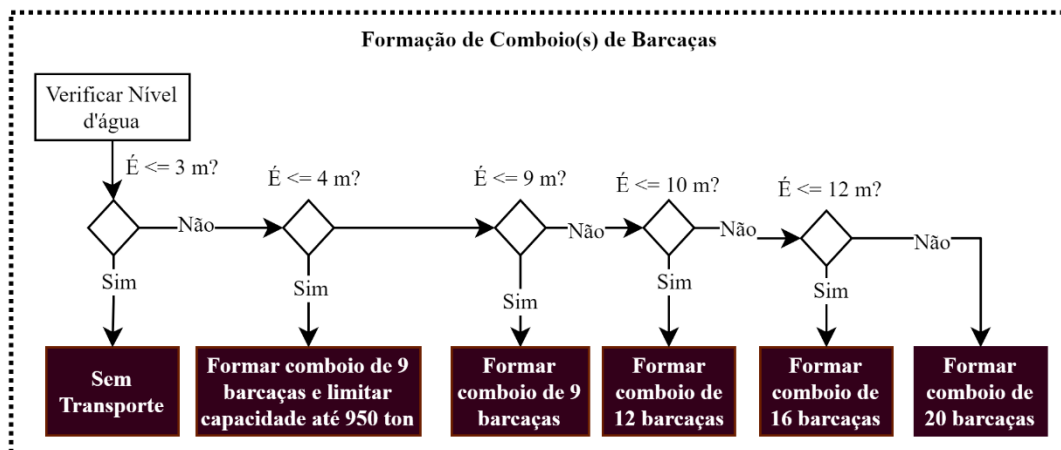


Figura 3-4: Critério para formação de comboio de barcaças

Para o nível d'água de até quatro metros de profundidade, forma-se comboios de nove barcaças com capacidade limitada a 950 toneladas por barcaça, um total de 8,550 mil toneladas, uma redução de 52,50% da capacidade total. Tal restrição no carregamento é em razão do trecho crítico do rio (capítulo 3.5 – Trecho Crítico à Navegação). Contudo, para o nível d'água de até nove metros de profundidade, é utilizado o comboio de 09 barcaças, sem restrição de carregamento. Este comboio de barcaças tem as dimensões de 210 metros de comprimento e 33 metros de boca, conforme consta na Figura 3-5.

Para o nível d'água de até dez metros de profundidade, é utilizado o comboio de 12 barcaças, sem restrição de carregamento. As dimensões de comboio de barcaça são de 210 metros de comprimento e 44 metros de boca, com capacidade de carregamento de 24 mil toneladas (Figura 3-6).

Para o nível d'água de até 12 metros de profundidade, é utilizado o comboio de 16 barcaças, com 270 metros de comprimento e 44 metros de boca, com capacidade de 32 mil toneladas (Figura 3-7).

Por fim, para o nível d'água acima de 12 metros de profundidade, foi utilizado o comboio com 20 barcaças, medindo 270 metros de comprimento e 55 metros de boca, com 40 mil toneladas de carregamento (Figura 3-8).

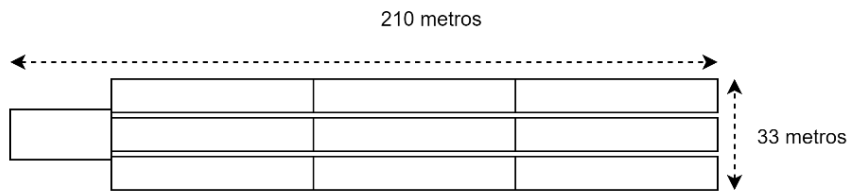


Figura 3-5: Formação do comboio de 09 barçaças

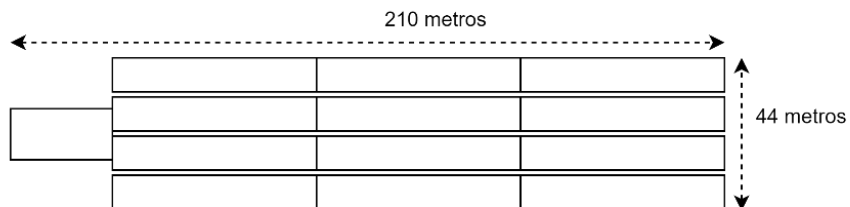


Figura 3-6: Formação do comboio de 12 barçaças



Figura 3-7: Formação do comboio de 16 barçaças

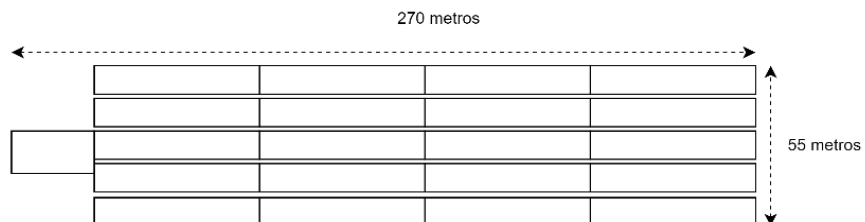


Figura 3-8: Formação do comboio de 20 barçaças

A seguir é apresentado o detalhamento dos serviços de transportes adotados nesta tese.

### 3.7 Cenários

Nesta tese, foram desenvolvidos cinco cenários, divididos em Cenário-Base – cenário referência – e quatro Cenários Hipotéticos. Neste último, os dois primeiros apresentam condições hidrológicas distintas entre si, e os outros dois utilizam um único comboio de barçaças, independente da condição hidrológica.

O objetivo desses cenários é verificar o impacto ambiental do THI em distintas condições hidrológicas e operações de transportes, descritos a seguir.

### 3.7.1 Construção de Cenário-Base

- **Curva da Média de Nível d'Água do rio Madeira**

O Cenário-Base tem o objetivo de representar o comportamento hidrológico do rio Madeira mais próximo da realidade, descrito na capítulo 3.4 (Comportamento Hidrológico do Rio Madeira), que considera a média do nível d'água no período entre 2013 e 2023 (Figura 3-9). Neste período, a média do nível d'água foi de 9,36 metros, com desvio-padrão de 4,67 metros e erro padrão de 1,35.

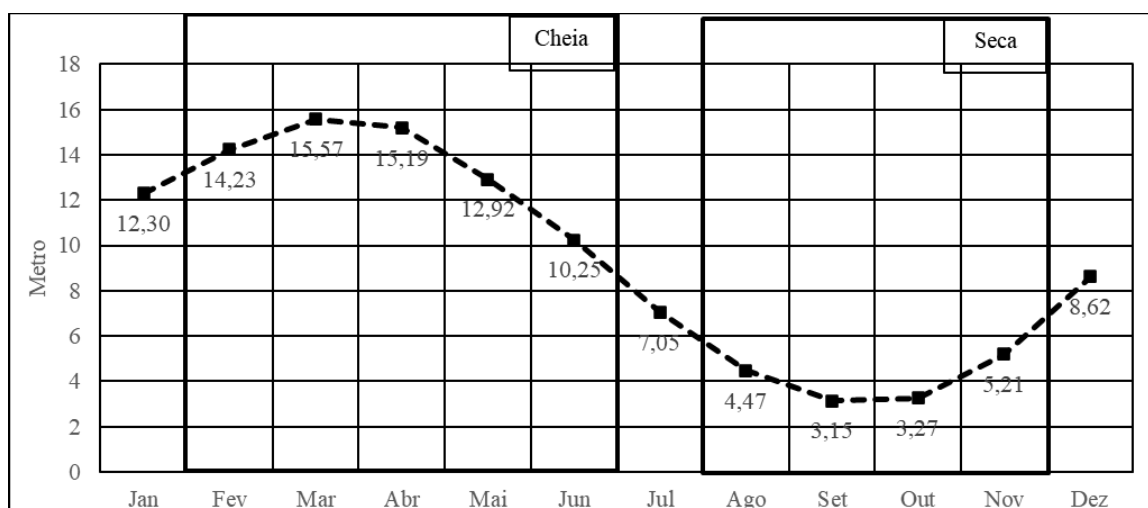


Figura 3-9: Comportamento da curva da média de nível d'água do rio Madeira entre 2013 e 2023

O maior valor (limite superior) ocorreu em março (15,57 metros), enquanto o menor valor (limite inferior) ocorreu em setembro (3,15 metros). Na cheia, a média do nível d'água foi de 13,63 metros, enquanto na seca foi de 4,03 metros de profundidade, e uma média anual de 9,35 metros.

- **Configuração dos Comboios de Barcaças**

Nesta tese, adotou-se a curva de grãos (soja e milho) transportados por meio do rio Madeira em 2023, cujos dados foram extraído das bases de dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), um total de 8,059 milhões de toneladas (Brasil, 2025a).



A partir da configuração das curvas de nível d'água e de grãos transportados (Figura 3-10), foi possível verificar que a maior parte dos grãos foram transportados no período de cheia, representando 56,32% (4,538 milhões de toneladas) do total anual, enquanto 18,97% (1,528 milhões de toneladas) foram transportados na seca, e 24,71% (1,991 milhões de toneladas) no período hidrológico de transição.

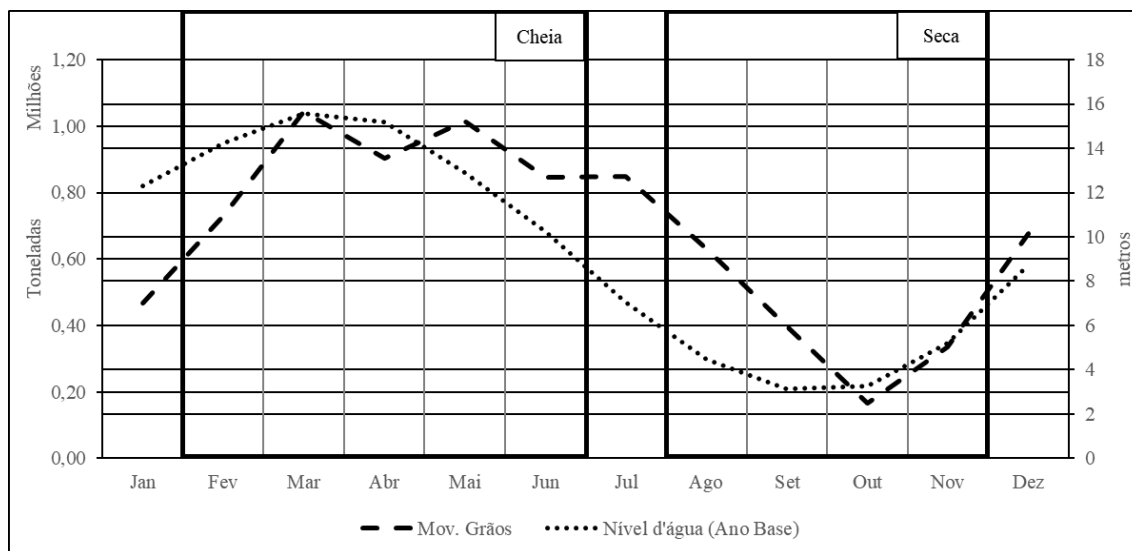


Figura 3-10: Curvas de Nível d'Água e de Grãos Transportados

A concentração de grãos transportados na cheia coincide com o período de colheita dos grãos, que são produzidos no Estado do Mato Grosso (Tabela 3-1). O milho tem duas safras: a primeira ocorreu entre fevereiro e maio; e a segunda ocorreu entre maio e agosto. A soja tem apenas uma safra, e sua colheita ocorreu entre janeiro e abril de 2023 (Conab, 2022).

Tabela 3-1: Calendário de Colheita dos grãos produzidos em Mato Grosso, na safra 2022/23

MT	Verão			Outono			Inverno			Primavera		
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Milho 1ª Safra		■	■			■						
Milho 2ª Safra					■	■	■	■				
Soja	■	■	■	■								

A formação dos comboios de barcaças, descrito no capítulo 3.6 (Formação de Comboio de Barcaças), está sintetizada na Tabela 3-2. Nesta tabela, verifica-se a formação dos comboios de barcaças a partir do nível d'água, considerando as restrições do calado no período de menor nível d'água.

Tabela 3-2: Critérios para a formação dos comboios de barçaças

Comboio	Quantidade de Barçaças					Unidade de Medida
	09 – 50%	09 – 100%	12	16	20	
Nível d'água	≤ 4	≤ 9	≤ 10	≤ 12	> 12	metros
Configuração das Barçaças	3x3	3x3	3x4	4x4	5x4	N/A
Calado Máximo Permitido	1,8	3,6				metros
Carregamento Máximo Permitido	8.550	18.000	24.000	32.000	40.000	toneladas
Potência Instada do Motor ( $PM_i$ )	1.200	1.500	3.600	4.000	5.000	HP
Tempo de Viagem – Ida e Volta ( $t$ )	192	190				horas

Tais informações possibilitaram verificar o transporte de grãos por comboio de barçaças ao longo de um ano (Figura 3-11). Conforme é possível observar, o comboio de nove barçaças com capacidade de carregamento limitado é empregado apenas em momentos de baixo nível d'água, sendo responsável por transportar 8,63% (695,673 mil toneladas de grãos) do total de grãos transportados no intervalo de tempo.

Por outro lado, o comboio de nove barçaças sem limitação de carregamento transportou 27,95% (2,252 milhões de toneladas) do total de grãos no ano. O comboio de 12 barçaças movimentou 306,144 mil de toneladas, representando 3,80% do total.

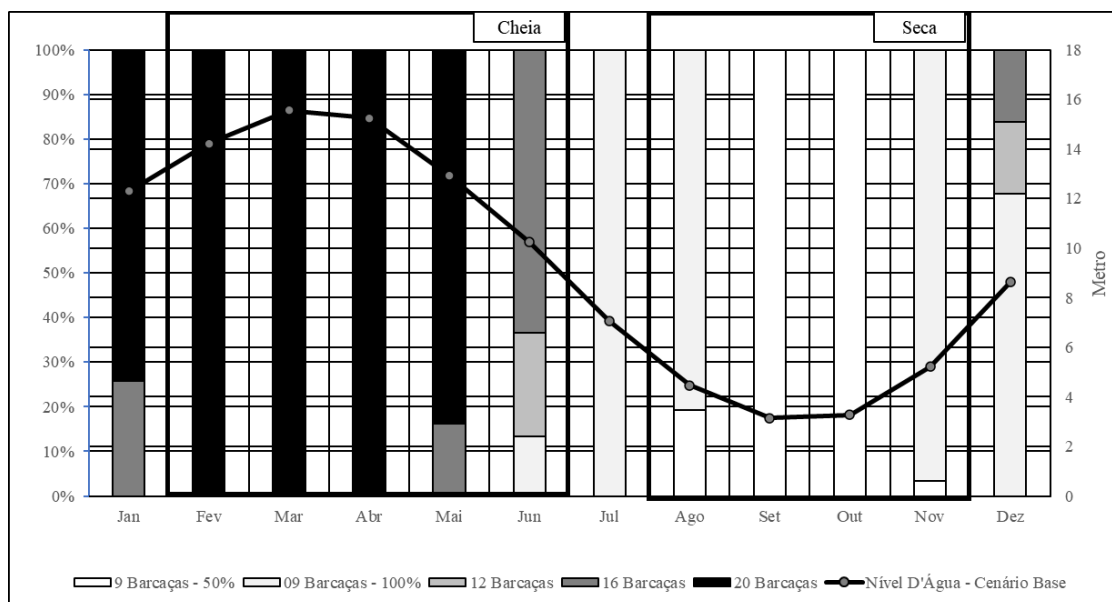


Figura 3-11: Percentual de grãos transportados por comboios de barçaças em 2023, em relação à média mensal do nível d'água entre 2013 e 2023

O comboio de 16 barçaças transportou um total de 928,030 mil de toneladas, 11,52% do total transportado. Este resultado é fruto da faixa de nível d'água em que opera, entre 10 e 12 metros de profundidade

Por fim, o comboio de 20 barcaças movimentou um total de 48,10%, um total de 3,876 milhões de toneladas de grãos. Este comboio de barcaças opera apenas na cheia, com sua predominância nos meses entre janeiro e maio.

### **3.7.2 Construção de Cenários Hipotéticos**

A partir do Cenário-Base, foram elaborados um total de quatro cenários hipotéticos, dos quais, (1) em dois cenários foram inferidas alterações na condição hidrológica, o que levou a mudanças nas operações de transportes; e (2) nos demais cenários foram determinadas o carregamento dos comboios de barcaças.

No caso dos cenários em que a condição hidrológica é uma variável de interesse (Cenários 1 e 2), sua construção foi a partir da leitura do trabalho de Gomes *et al.* (2020), que avaliaram os efeitos do aumento de gases de efeito estufa (GEE) e do desmatamento no ciclo hidrológico da bacia do rio Madeira. Para isto, os autores utilizaram os modelos Eta Regional (modelo de previsão climática) e MGB-IPH (modelo hidrológica), a pesquisa analisou as mudanças climáticas e de uso do solo para o cenário RCP 8.5, um dos mais pessimistas quanto às emissões. Os resultados indicaram um aumento médio de 72% na vazão d'água em Porto Velho/RO.

A partir deste resultado, nesta tese, inferiu-se que a vazão d'água pode variar em até 72%, tendo como referência o Cenário-Base. Para isto, fez-se necessário determinar uma função que permita prevê o valor do nível d'água (Variável Dependente –  $y$ ), a partir da variação da vazão d'água (Variável Independente –  $x$ ). Para isto, foi utilizado o método de Regressão Linear Simples, utilizando os dados de Nível e Vazão d'Água entre 2013 e 2023 (Cenário-Base).

Nesta tese, a equação foi obtida utilizando o *software* MS-Excel, ao plotar essas duas variáveis no gráfico de pontos (Figura 3-12). A regressão linear simples se mostrou adequada devido ao valor de 0,9874 do  $R^2$ , indicando elevada aderência dos dados.

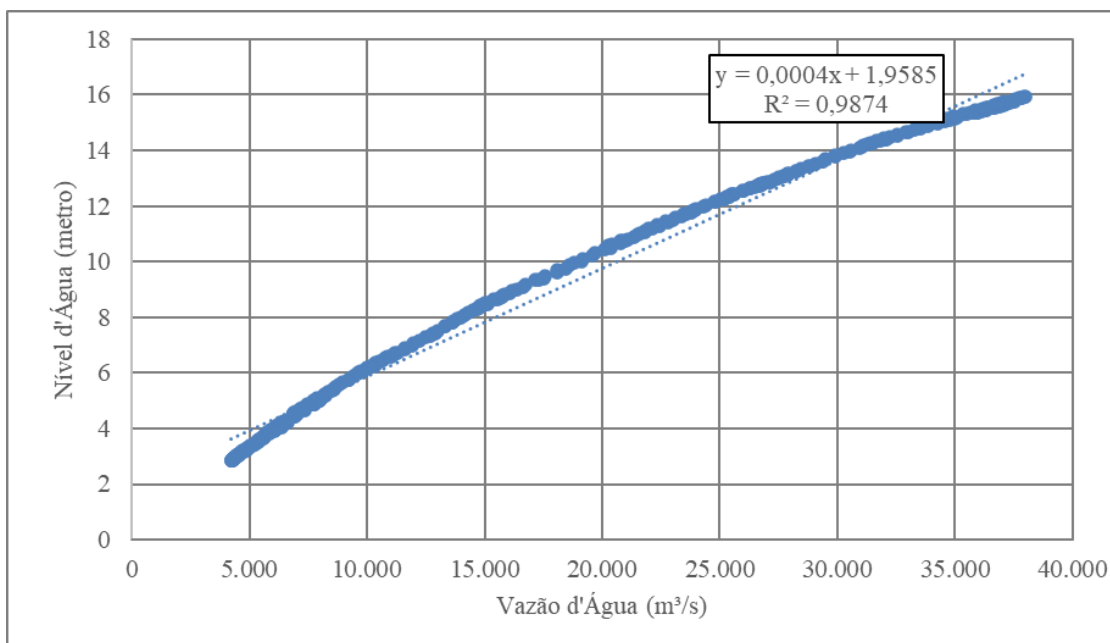


Figura 3-12: Resultado da Regressão Linear da Média Mensal dos Dados de Nível e Vazão D'Água

Os Coeficientes de Interseção e de Vazão d'Água apresentaram valor de 1,9585 e de 0,00038, respectivamente, o que permitiu construir a Equação 3-3.

$$y = 0,0004x + 1,9585 \quad \text{Equação 3-3}$$

Esta equação foi utilizada nos cenários em que a condição hidrológica é uma variável de interesse (Cenário 1 e Cenário 2), tratados a seguir.

### 3.7.2.1 Cenário 1

Este cenário consiste na redução da vazão d'água em 72% em relação ao Cenário-Base. Neste cenário, os dados de vazão d'água foram calculados por meio da Equação 3-4, e os dados de nível d'água foram calculados por meio da Equação 3-5.

$$V_{c1} = V_{cb} \times (1 - 0,72) \quad \text{Equação 3-4}$$

$$N_{c1} = 4 \times 10^{-4} \times V_{c1} + 1,9585 \quad \text{Equação 3-5}$$

O resultado é apresentado na Figura 3-13, no qual, observa-se que o nível d'água fica abaixo do limite mínimo para a navegação, exigido pela Marinha do Brasil (Brasil, 2018a), durante toda a seca, além de julho.

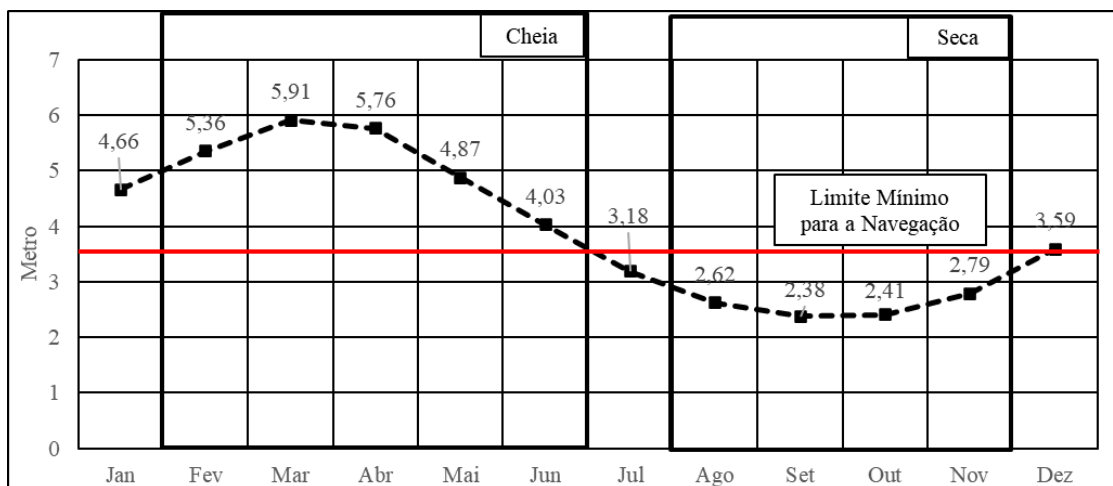


Figura 3-13: Comportamento do Nível d'Água no Cenário 1

Neste cenário, nos meses em que a navegação foi proibida, assumiu-se que os grãos seriam transportados pelo modo rodoviário, com origem na cidade de Sorriso/MT – município de maior produção de grãos do Estado – e destino o porto de Santarém/AM, por meio da BR-163, uma distância aproximada de 1375 km (Brasil, 2017a).

A Figura 3-14 apresenta o percentual de grãos transportados por comboio de barcaças em relação ao nível d'água no Cenário 1. Observa-se que os baixos níveis d'água (seca) levaram aos grãos serem escoados por meio do modo rodoviário. Neste cenário, entre janeiro e maio, os grãos foram transportados por meio do comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento, e em junho cerca de 70% dos grãos utilizaram o comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento, com o restante sendo transportado pelo comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento.

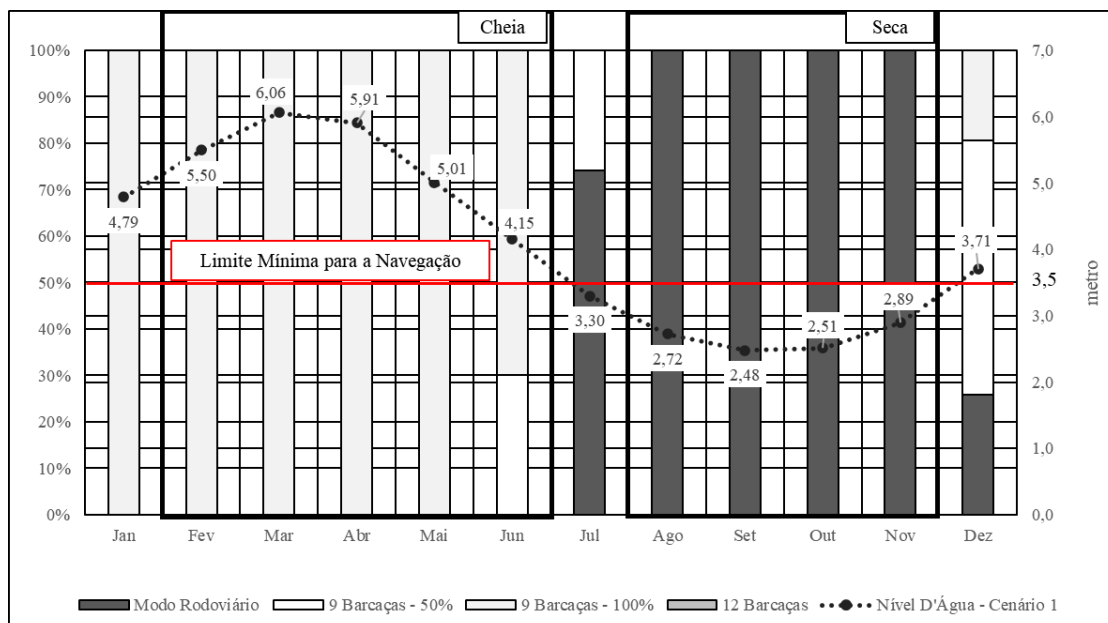


Figura 3-14: Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte em Relação ao Nível D'Água no Cenário 1

A Figura 3-15 permite constatar que o comboio de 09 barcaças sem limitação de carregamento transportou 60,58% (4,882 milhões de toneladas), enquanto o comboio de nove barcaças com limitação no carregamento transportou 10,46% (843,307 mil toneladas). O restante foi transportado pelo modo rodoviário, representando um total de 28,95% (2,333 milhões de toneladas) do total transportado no ano (8,058 milhões de toneladas). Os comboios de 16 e 20 barcaças não foram utilizados.

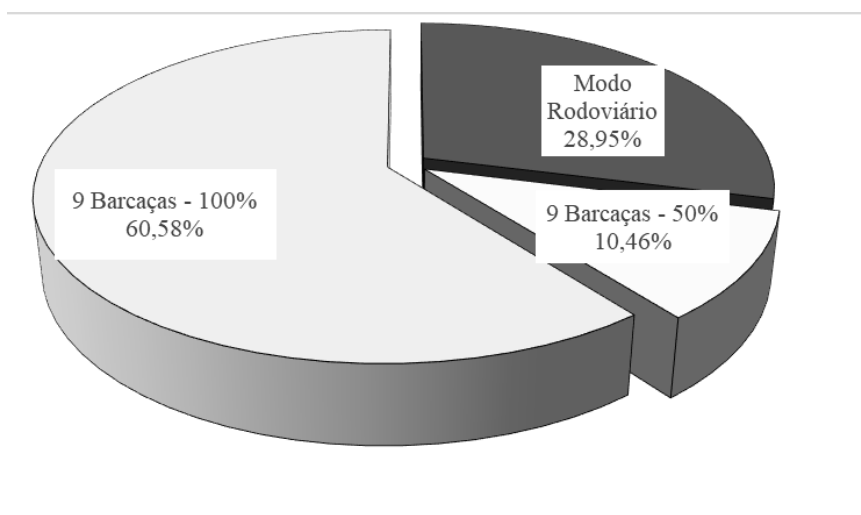


Figura 3-15: Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte do Cenário 1

A seguir é descrito o Cenário 2, no qual, o nível d'água tem um aumento em 72%, sendo, portanto, favorável à navegação.

### 3.7.2.2 Cenário 2

Análogo ao Cenário 1, neste cenário, a vazão d'água foi calculada para aumentar em 72%, utilizando, para isto, da Equação 3-6, e o nível d'água foi calculado por meio da Equação 3-7.

$$V_{c2} = V_{cb} \times (1 + 0,72) \quad \text{Equação 3-6}$$

$$N_{c2} = 4 \times 10^{-4} \times V_{c2} + 1,9585 \quad \text{Equação 3-7}$$

O resultado é apresentado na Figura 3-16, no qual, observa-se que o nível d'água fica acima do limite mínimo para a navegação o ano inteiro, ou seja, não houve há restrições à navegação neste cenário.

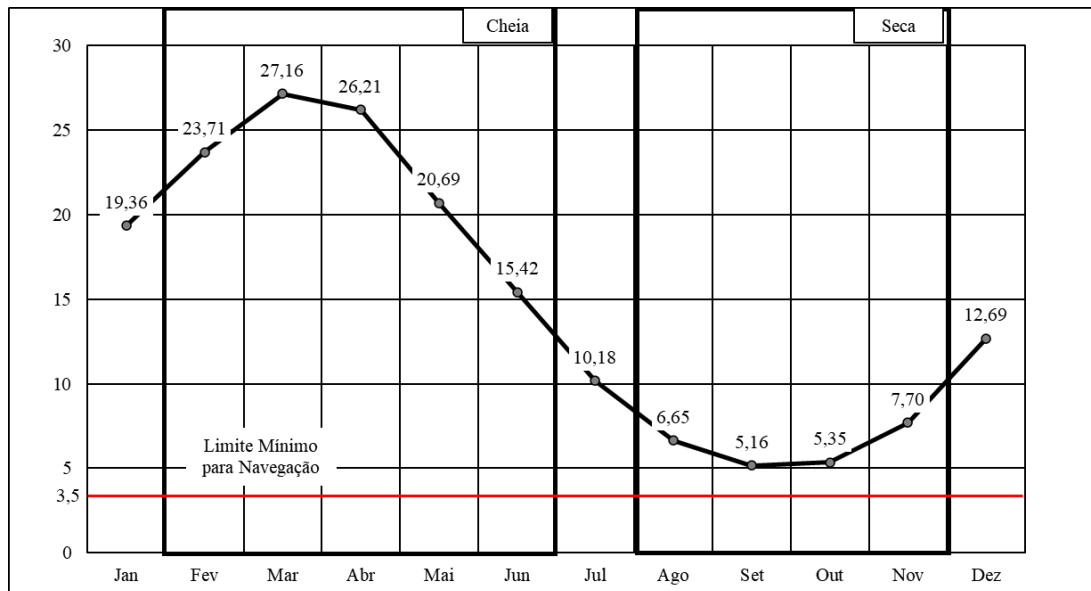


Figura 3-16: Comportamento do Nível D'Água no Cenário 2

A Figura 3-17 apresenta o percentual de grãos transportados por comboio de barcaças em relação ao nível d'água no Cenário 2. Observa-se que a predominância do comboio de 20 barcaças na cheia, e na seca, período de menor nível d'água, foi utilizado o comboio de 09 barcaças sem restrição ao carregamento.

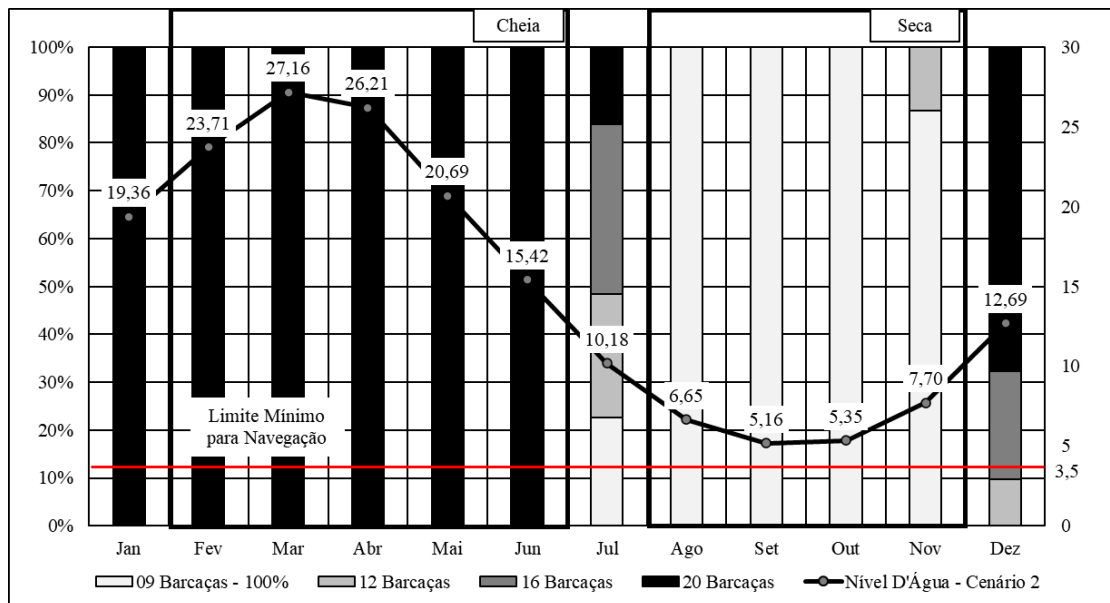


Figura 3-17: Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaça em Relação ao Nível D'Água no Cenário 2

A Figura 3-18 permite constatar que o comboio de 20 barcaças transportou 69,49% (5,600 milhões de toneladas), o comboio de 16 barcaças respondeu por 5,63% (453,907 mil toneladas), o comboio de 12 barcaças respondeu por 4,09% (329,386 mil toneladas) e o comboio de 09 barcaças sem restrição ao carregamento respondeu por 20,79% (1,675 milhões de toneladas). Neste cenário, não houve restrições ao carregamento.

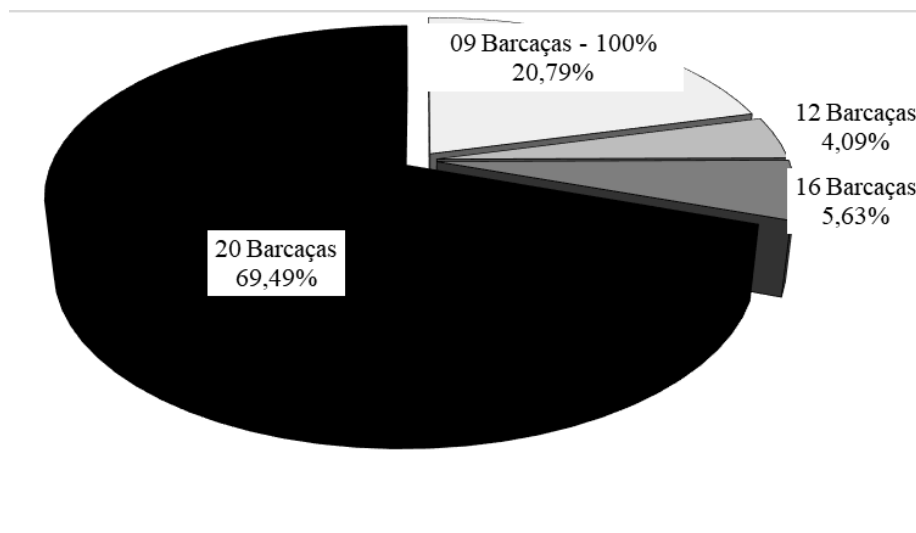


Figura 3-18: Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaça do Cenário 2

A seguir é descrito o Cenário 3, no qual, os grãos são transportados por meio do comboio de nove barcaças.



### 3.7.2.3 Cenário 3

Diferente dos Cenários 1 e 2, neste cenário, os grãos são transportados apenas pelo comboio de 09 barcaças com restrição ao carregamento, independentemente da condição hidrológica.

A seguir, é descrito o cenário 4, no qual, os grãos são transportados por meio do comboio de 20 barcaças.

### 3.7.2.4 Cenário 4

Análogo ao Cenário 3, neste cenário, os grãos são transportados por meio apenas do comboio de 20 barcaças, independentemente da condição hidrológica.

A seguir, apresenta-se as informações relacionadas à Fase II – Análise de Inventário.

## 4 ANÁLISE DE INVENTÁRIO

Esta fase consiste no levantamento de dados e procedimentos de cálculos para quantificar as entradas e saídas significativas de um sistema de produto. identificação dos serviços de transportes, e de seus componentes. Nesta tese, adotou-se a estrutura dos serviços de transporte desenvolvido por Merchan et al. (2019), conforme apresentado no capítulo 3.2.1.2 (Serviços de Transportes).

A hidrovia do rio Madeira apresenta variação hidrológica elevada, característica natural, com impactos que alteram a quantidade de barcaças dos comboios. Diante disto, foi realizada uma análise do comportamento hidrológico no período de dez anos. A descrição desta atividade é descrita no capítulo a seguir.

### 4.1 Serviços de Transporte do THI

A seguir é apresentado a memória de cálculo da quantificação das trocas ambientais dos Serviços de Transportes adotados nesta tese (Figura 3-2). Cabe ressaltar que o método de cálculo para a quantificação do inventário de ciclo de vida adotado nesta tese foi baseado no trabalho de Spielmann *et al.* (2007), na qual, apresenta os Componentes dos Serviços de Transportes ( $p_i, i = 1, \dots, 7$ ) ligados ao processo unitário ( $p_T$ ), referenciado na base de dados da *Ecoinvent 3.5*, que também foi adotada nesta tese por ser amplamente utilizada em trabalhos científicos (Mark Goedkoop *et al.*, 2016).

Os Fatores de Demanda ( $d_j$ ) são determinados por meio da conexão entre os Componentes dos Serviços de Transportes e o fluxo de referência<sup>8</sup>, que nesta tese é o momento de transportes – tonelada-quilômetro ( $tkm$ ). Os resultados cumulativos do ICV para o serviço de transporte  $i$  ( $x_i^T$ ) são apresentados na Equação 4-1:

$$x_i^T = \sum_{j=1}^n \frac{x_i^j}{r(p_j)} \cdot d_j \quad \text{Equação 4-1}$$

onde  $n$  representa o número de Componentes de Serviços de Transportes; e  $x_i^j/r(p_j)$  indica as trocas ambientais cumulativas ( $x_i$ , e.g. emissão de  $CO_2$ ) de um dado

---

<sup>8</sup> Fluxo de Referência: “medida das saídas de processos em um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional” (ABNT, 2009a, p. 13).

componente de serviço de transporte (processo unitário,  $p_j$ ) que está relacionado ao fluxo de referência ( $r(p_j)$ ), e.g. manufatura de uma embarcação.

O detalhamento dos serviços de transportes é apresentado a seguir.

#### **4.1.1 Serviço de Operação de Transportes**

O Serviço de Operação de Transporte compreende os Componentes de Pré-Combustão ( $P_1$ ) e Viagem de Transporte ( $P_2$ ), descrito a seguir.

##### **4.1.1.1 Pré-Combustão ( $P_1$ )**

A Pré-Combustão é definida pelas trocas ambientais da cadeia de combustível, que se inicia na extração do recursos natural (petróleo), transportes, armazenagem, refino, até a disponibilidade do combustível nas bombas de abastecimento dos empurradores (Spielmann e Scholz, 2005).

Nesta tese, não foram encontrados dados detalhados desta cadeia de suprimentos. Contudo, a *Ecoinvent* dispõe do processo unitário '*Diesel {BR}/market for diesel | Cut-off, U*', destinado a representar as trocas ambientais médias da pré-combustão na região geográfica do Brasil, sendo adotado nesta tese. Adotou-se os Processos de Mercado (*Market Processes*) por incluir, além das entradas, os processos de transportes de uma determinada região geográfica (PRé, 2025). A seguir é descrito o método de cálculo do Componente de Serviço de Transporte Viagem de Embarcação.

##### **4.1.1.2 Viagem de Transporte ( $P_2$ )**

Este Componente representa as trocas ambientais relacionadas às viagens dos comboios de barças, tendo como principal variável os consumos de combustível e lubrificante, detalhado a seguir.

###### **a. Consumo de Combustível e Lubrificante**

Nesta tese, o consumo de combustível foi obtido por meio do método de cálculo adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT), utilizando o Sistema de Custos Referenciados de Obras (SICRO) como referência (Brasil, 2017b).

No SICRO, o consumo de combustível e lubrificante é calculado a partir da Produção Horária ( $tkm/h$ ), das horas produtivas e improdutivas, da utilização operativa

e improdutiva e do valor da quantidade de energia (kWh) em um litro de combustível. No que se refere ao consumo de lubrificante, foi considerado um percentual do consumo de combustível.

A seguir é descrito o método de cálculo da Produção Horária.

- **Produção Horária**

Neste método de cálculo, foi adotado a tabela do SICRO, utilizando as informações do “Equipamento líder: E9057 – Batelão sem propulsão com capacidade de 100t” como referência para os cálculos. Tais informações foram extraídas do Volume 3 do Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes, do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre – DNIT (Brasil, 2017c). Nesta planilha, calcula-se primeiro a Produção Horária do Comboio de Barcaças  $i$  ( $PH_i$ ), conforme Equação 4-2.

$$PH_i = \frac{a_i \times b \times c \times d \times j_i}{2} \quad \text{Equação 4-2}$$

Onde,

$a$  – Capacidade de Carregamento do Comboio de Barcaça  $i$  – medido em toneladas;

$b$  – Fator de Carga;

$c$  – Fator de Conversão;

$d$  – Fator de Eficiência;

$j$  – Velocidade Média do Comboio de Barcaça  $i$  – medido em km/h;

No transporte hidroviário de grãos por meio do rio Madeira, os comboios de barcaças viajam carregados apenas em um sentido (Porto Velho/RO – Itacoatiara/AM), retornando vazios, sendo o cálculo da Produção Horária uma média do ciclo. Define-se ciclo como uma viagem de ida e volta dos comboios de barcaças (Brasil, 2017b).

Cumpra definir as seguintes variáveis (Brasil, 2017b):

- Fator de Carga ( $b$ ): consiste na relação entre a capacidade efetiva e a capacidade geométrica (ou nominal);
- Fator de Eficiência ( $c$ ): consiste na relação entre os tempos das viagens efetiva e nominal;

- Fator de Conversão (*d*): consiste na relação entre Volume Medido, que obedece a um critério objetivo de medição, e o Volume Manipulado pelos equipamentos que dispõem de caçambas, reservatórios ou implementos equivalentes;

A Tabela 4-1 dispõe dos valores de Fator de Carga (*b*), Fator de Eficiência (*c*) e Fator de Conversão (*d*) extraídos de Brasil (2017b). Além disto, a velocidade média dos comboios de barcaças foi extraída de Brasil e INECO (2015, p. 101), em que os comboios de 09 e 12 barcaças foram de nove km/h – utilizados no período de seca –, enquanto os comboios de 16 e 20 barcaças foi de 11 km/h – utilizados no período de cheia.

Tabela 4-1: Valores dos Fatores considerados nesta tese

Descrição	Valor
Fator de Carga ( <i>b</i> )	1,00
Fator de Eficiência ( <i>c</i> )	1,00
Fator de Conversão ( <i>d</i> )	0,83

O resultado deste cálculo está disposto na Figura 4-1, medido em momento de transporte por hora (*tkm/h*). Conforme é possível observar, o comboio de nove barcaças apresenta o menor valor, com uma produção 64,38% menor que o comboio de 12 barcaças; 78,14% menor que o comboio de 16 barcaças; e 82,51% menor que o comboio de 20 barcaças.

Os resultados de  $PH_i$  foram utilizados no cálculo do Consumo de Diesel dos comboios de barcaças, medido em mililitros de diesel por tkm.

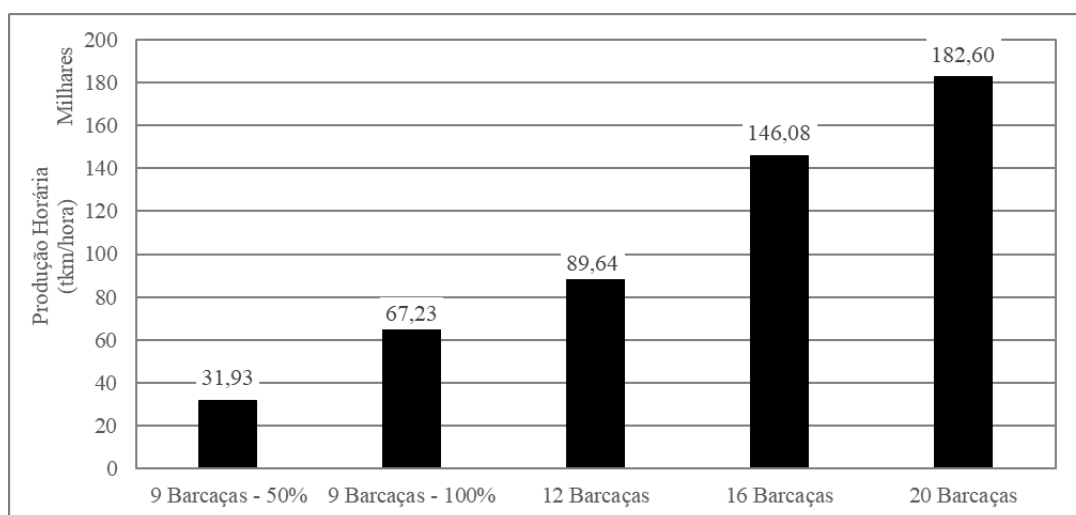


Figura 4-1: Produção Horária dos Comboios de Barcaças

Em seguida, foi calculado o Coeficiente de Utilização Produtiva, que consiste na quantificação da utilização do equipamento durante a operação de transporte, enquanto a improdutiva quantifica o equipamento fora de operação, com o motor parado (Brasil, 2017b).

Nesta tese, os Coeficientes de Utilização Produtiva e Improdutiva foram calculados apenas para os empurradores, com vistas a quantificar o consumo de combustível dos comboios de barcaças. Neste contexto, o Coeficiente de Utilização Produtivo do Comboio de Barcaças  $i$  ( $CP_i$ ) é calculado por meio do quociente da divisão entre a Potência Instalada Real ( $PIR_i$ ) e a Produção Instalada Planejada ( $PIP$ ), e deve ser menor ou igual a 1 (Equação 4-3).

$$CP_i = \frac{PIR_i}{PIP} \quad \text{Equação 4-3}$$

$$CI_i = 1 - CP_i \quad \text{Equação 4-4}$$

Por outro lado, o Coeficiente de Utilização Improdutivo é apresentado na Equação 4-4.

- **Total de Horas Produtiva e Improdutiva**

Em seguida, calculou-se o Total de Horas (Produtiva e Improdutiva) dos Comboios de Barcaças  $i$  ( $TH_i$ ), que consiste no produto entre a quantidade unitária da Produção Horária do ( $1/PH_i$ ), da Quantidade de Empurrador ( $Q_i$ ) e dos Coeficientes Produtivo ( $CP_i$ ) e Improdutivo ( $CI_i$ ), conforme exposto na Equação 4-5.

$$TH_i = \frac{1}{PH_i} \times Q_i \times (CP_i + CI_i) \quad \text{Equação 4-5}$$

- **Consumo de Diesel**

A partir deste cálculo, foi possível calcular o Consumo de Diesel por  $tkm$  do Comboio de Barcaça  $i$  ( $CD_i$ ), que considerou o produto do Consumo Específico do Empurrador do Comboio de Barcaça  $i$  ( $\theta_i$ ), do Total de Horas ( $TH_i$ ) e da Potência Instalada de Projeto ( $PIP$ ), conforme exposto na Equação 4-6 (Brasil, 2017b).

$$CD_i = \theta_i \times HT_i \times PIP$$

Equação 4-6

Nesta tese, por questões de simplificação, foi adotado um único tipo de empurrador para os Comboios de Barcaças  $i$ , com uma  $PIP$  de cinco mil HP (3.728,56 kWh), variando o Coeficiente de Utilização Produtiva dos comboios de barcaças. Ademais, o valor do Consumo Específico adotado foi 0,18  $l/kWh$ , recomendado por Brasil (2017c). Os resultados estão dispostos na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Valores da Operação de Transporte dos Comboios de Barcaças

Comboios-Tipo	Potência Instalada		Coeficiente de Utilização		Total de Horas ( $TH_i$ )	Fonte
	HP	kWh	Produtiva	Improdutiva		
9 Barcaças – 50%	1.200	894,85	24%	76%	3,13E-5	(Brasil, 2014, p. 134)
9 Barcaças – 100%	1.500	1.864,28	50%	50%	1,49E-4	
12 Barcaças	3.600	2.684,56	72%	28%	1,12E-05	(Brasil e INECO, 2014, p. 147)
16 Barcaças	4.000	2.982,85	80%	20%	6,85E-06	(Brasil e INECO, 2015, p. 87)
20 Barcaças	5.000	3.728,56	100%	0%	5,48E-06	

Conforme é possível observar, o Coeficiente de Utilização Produtiva varia conforme o carregamento do comboio de barcaça. Ou seja, o comboio de menor capacidade utiliza apenas 30% da potência do motor, enquanto o comboio de 20 barcaças utiliza 100%.

Entre os comboios de barcaças, o resultado da Equação 4-6 permite constatar que o comboio de nove barcaças tem o maior consumo de diesel, um valor aproximado de 21,016  $ml/tkm$ , enquanto os comboios de 12, 16 e 20 barcaças são, respectivamente, 180,70% (7,487  $ml/tkm$ ), 357,44% (4,594  $ml/tkm$ ) e 471,80% (3,675  $ml/tkm$ ) maiores que o comboio de nove barcaças (Figura 4-2).

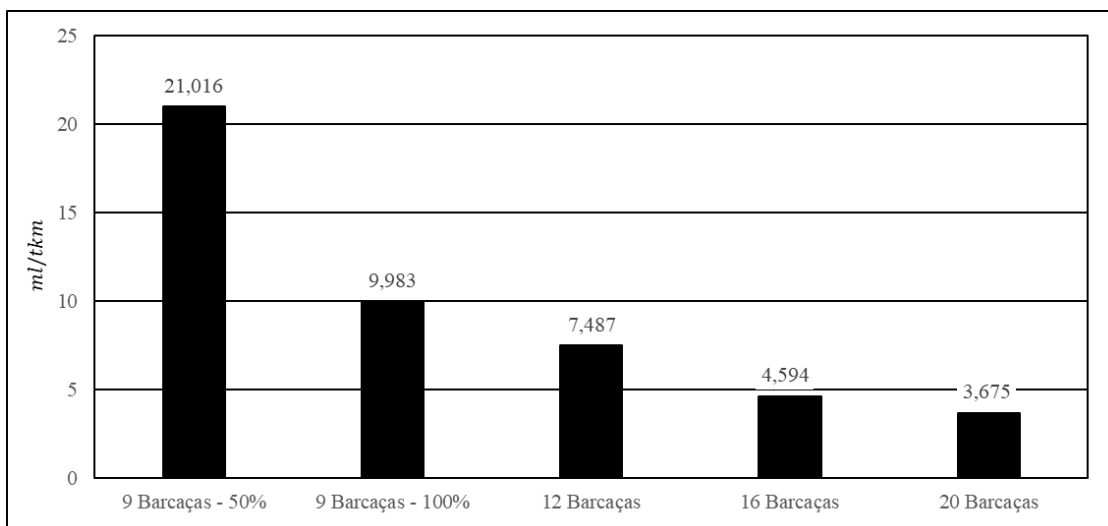


Figura 4-2: Consumo de Combustível dos Comboios de Barcaças

A Figura 4-3 compara o consumo de combustível por *tkm* e a produção horária dos comboios de barcaças. O comboio de 20 barcaças, por exemplo, é o que tem a maior produção horária (182,60 mil *tkm/h*) e tem o menor consumo de combustível (3,675 *ml/tkm*), enquanto o comboio de nove barcaças tem a menor produção horária (31,93 mil *tkm/h*) e o maior consumo de combustível (21,016 *ml/tkm*) da amostra.

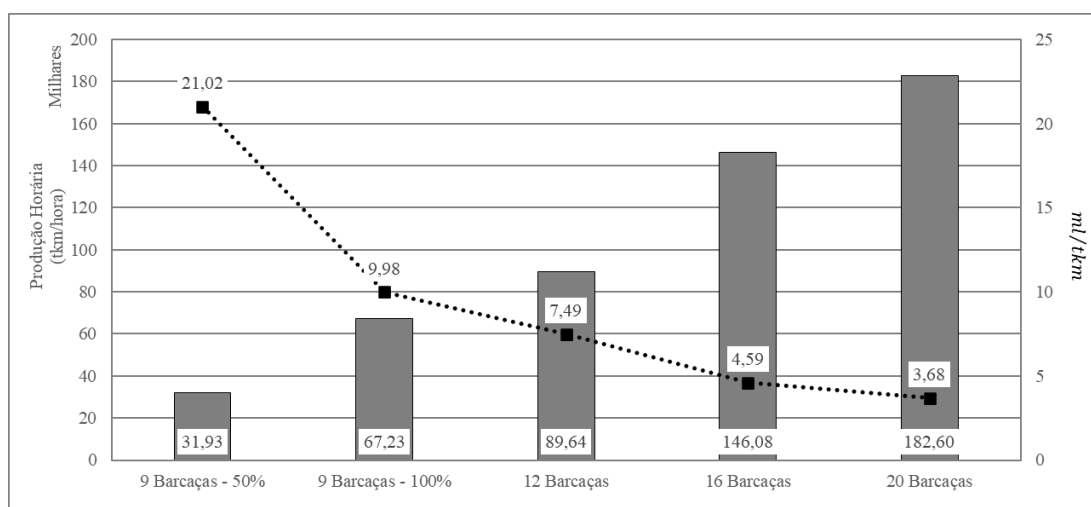


Figura 4-3: Consumo de diesel (ml) por *tkm* dos Comboios de Barcaças

O comportamento das curvas dos dados de Produção Horária e Consumo de Combustível apresentam indícios de uma relação inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a produção horária, menor o consumo de combustível, indicando uma eficiência de escala.

Nesta tese, adotou-se o processo unitário ‘*Transport, freight, inland waterways, barge {RoW}/ processing / Cut-off, U*’ para quantificar as trocas ambientais da queima de combustível e de lubrificante nos motores dos empurradores, cujo valor de consumo de



combustível considerado pela *Ecoinvent* é de 9,39 ml/tkm, tendo os gases poluentes (Saídas), e suas respectivas quantidades disponibilizados na Tabela 4-3. As Entradas deste processo unitário foram desconsideradas por estarem contidos nos processos unitários da Pré-Combustão e do Consumo de Lubrificante.

Tabela 4-3: Valores dos gases poluentes emitidos na queima de combustível, extraído da *Ecoinvent*

Gás Poluente	<i>Ecoinvent</i> (Kg)
Amônia	4,87E-07
Benzeno	1,78E-07
Benzo(a)pireno	7,24E-14
Cádmio	9,39E-11
Dióxido de Carbono, fóssil	2,96E-02
Monóxido de Carbono, fóssil	2,54E-05
Cromo	4,70E-10
Cobre	1,60E-08
Monóxido de Dinitrogênio	3,11E-06
Cloreto de Hidrogênio	9,95E-09
Chumbo	1,88E-10
Mercúrio	6,58E-13
Metano, fossil	2,25E-07
Níquel	6,58E-10
Óxidos de Nitrogênio	4,70E-04
NMVOOC, Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metânicos, origem não especificada	9,39E-06
Partículas, < 2.5 um	8,67E-06
Partículas, > 10 um	3,71E-07
Partículas, > 2.5 um, e < 10um	7,23E-07
Selênio	9,39E-11
Dióxido de Enxofre	5,64E-06
Tolueno	7,52E-08
Xileno	7,52E-08
Zinco	9,39E-09

A quantificação deste processo unitário para os comboios de barcaças ocorre por meio do quociente da divisão entre o consumo de combustível do comboio de barcaças  $i$  e o valor do consumo de combustível padrão da *Ecoinvent*.

- **Consumo de Lubrificante**

Nesta tese, o consumo de lubrificante foi 15% do consumo de combustível, previsto por Brasil (2017b). Esta variável (consumo de lubrificante), foi representada por

dois processos unitários, mantendo o padrão da *Ecoinvent* para a composição do processo relacionado ao consumo de combustível, em que se adotou:

- ‘*Lubricating oil {RER} | market for lubricating oil | Cut-off, U*’, que representa 17,40% das características observadas na Região da Europa (RER); e
- ‘*Lubricating oil {RoW} | market for lubricating oil | Cut-off, U*’, representa 82,60% das características observadas no Resto do Mundo (RoW), exceção à Região da Europa.

A composição das Entradas de ambos os processos consiste na cadeia de suprimentos com origem na Produção, passa pelo Transporte do Lubrificante, acondicionamento até a disposição nos tanques dos rebocadores. O Consumo de Lubrificante foi incluído no processo unitário de Consumo de Diesel.

A seguir é apresentado os Componentes de Serviço de Transporte relacionados à Frota de Embarcações.

#### **4.1.2 Frota de Transporte**

A Frota de Transporte é composta pelos componentes relacionados à Manufatura ( $P_3$ ), à Manutenção ( $P_4$ ) e à Disposição Final ( $P_5$ ) dos veículos utilizados no transporte dos grãos. Nesta tese, dois modos de transportes foram considerados; (1) modo hidroviário, cuja frota é composta por comboio de barcaças (empurrador e barcaças); e (2) modo rodoviário, cuja frota é composta por caminhão.

##### **4.1.2.1 Manufatura da Frota ( $P_3$ ):**

A Manufatura ( $P_3$ ) consiste nas trocas ambientais relacionadas ao processo de fabricação dos veículos, composto pelos motores dos rebocadores, peças de metal e materiais elétricos, serviços de montagem e pintura (acabamento). A seguir é detalhada o método de cálculo e composição do modo hidroviário.

##### ***i. Manufatura de Barcaças***

Nesta tese, foi adotado o processo ‘*Barge {GLO} | Market for | Cut-off, U*’ para representar as trocas ambientais da manufatura das barcaças, cuja composição consiste

em 33,05% das características de manufatura de barcaças da Região da Europa (*RER*) e 66,95% do Resto do Mundo (*RoW*).

A quantificação dos recursos utilizados neste processo unitário foi calculada por meio do quociente da divisão da quantidade de barcaças do comboio  $i$  ( $b_i$ ) e o produto entre o momento de transporte no ano ( $d$ ) e a vida útil ( $VU$ ), previsto na Equação 4-7.

$$y_{2i} = \frac{b_i}{d \times VU} \quad \text{Equação 4-7}$$

## ii. *Manufatura do Rebocador*

No que se refere à manufatura dos rebocadores, foi considerado o peso de 420 toneladas, a vida útil de 20 anos e as Horas Trabalhadas por Ano (HTA) de 5.760 horas, previsto em Brasil (2017c).

No SimaPro, as trocas ambientais da manufatura do rebocador foram representadas pelo processo unitário ‘*machine operation, diesel, >=74,57kW, high load fator {GLO}*’ como uma referência, cujas características se assemelham às operações de um equipamento movido à diesel e de elevado carregamento e potência de motor. Este processo unitário é medido em hora, e, neste contexto, sua quantificação considerou o valor unitário da Produção Horária de Comboios de Barcaças  $i$  ( $1/HTA_i$ ).

A composição deste processo unitário consiste apenas da manufatura do empurrador, representado pelo processo unitário ‘*Building machine {GLO}| market for | Cut-off, U*’.

na Manufatura do Rebocador e nos Consumos de Diesel e Lubrificante. Estes últimos já estão representados em outros processos unitários, resultando na sua exclusão da composição.

A Manufatura do Rebocador é representado pelo processo unitário ‘*Building machine {GLO}| market for | Cut-off,U*’, que tem o padrão de potência de motor igual ou superior a 100 HP, diferente da potência do motor do empurrador adotado nesta tese, que é de cinco mil HP, sendo necessário a realização de uma parametrização. Para isto, calculou-se o produto do quociente da divisão do peso do empurrador adotado nesta tese ( $Peso_E$ ), que é de 420 toneladas, e do peso do empurrador padrão contido na base de dados da *Ecoinvent* ( $Peso_P$ ), e das representatividades unitárias das horas trabalhadas no ano ( $1/HTA$ ) e da vida útil ( $1/VU$ ), previsto na Equação 4-8.

$$x_2 = \frac{Peso_E}{Peso_P} \times \frac{1}{HTA} \times \frac{1}{VU} \quad \text{Equação 4-8}$$

A seguir é descrito ao componente de serviços de transportes relacionados à Manutenção da Frota.

#### 4.1.2.2 Manutenção da Frota (P<sub>4</sub>)

O processo unitário utilizado como referência para quantificar as trocas ambientais cumulativas relacionadas à Manutenção das Embarcações (P<sub>3</sub>) adotado nesta tese é: *'Maintenance, barge {GLO}| market for | Cut-off, U'*, que consiste na realização de pintura da embarcação a cada quatro anos até o fim de sua vida útil.

Este processo unitário é composto por 33,06% do processo unitário *'Maintenance, barge {RER}| processing | Cut-off, U'*, cujas características são da Região da Europa; e 66,94% do processo unitário *'Maintenance, barge {RoW}| processing | Cut-off, U'*, cujas características são do Resto do Mundo (RoW).

Em ambos os processos unitários constam a Entrada *'Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RER}| market for alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state | Cut-off, U'*, com uma quantidade de 43.600 kg, e a Saída *'NMVOC, non-methane volatile organic compounds'*, com uma quantidade de 15700 kg. Esta composição, assim como suas quantidades, são padrões da *Ecoinvent*, sendo utilizados nesta tese, pois, não foram encontrados valores específicos dos comboios de barcaças.

Nesta tese, foi adotado a Equação 4-7 para quantificar os recursos utilizados na manutenção.

#### 4.1.2.3 Disposição Final da Frota (P<sub>5</sub>):

Por fim, o componente Disposição Final da Frota (P<sub>5</sub>) compreende as trocas ambientais relacionadas ao tratamento dos resíduos gerados na Manufatura (P<sub>3</sub>) e na Manutenção (P<sub>4</sub>). Contudo, este componente de serviço de transporte foi desconsiderado por não ter um processo específico na base dados da *Ecoinvent*.

A seguir é apresentado os componentes do serviço de transportes relacionado à Infraestrutura Hidroviária.

### 4.1.3 Infraestrutura de Transporte

A Infraestrutura Hidroviária é constituída pelos componentes de serviços de transportes relacionados à Construção ( $P_6$ ), Operação & Manutenção ( $P_7$ ) e Disposição Final ( $P_8$ ) da infraestrutura de transporte. A seguir é detalhado a infraestrutura do modo hidroviário.

#### 4.1.3.1 Construção da Infraestrutura ( $P_6$ ):

Este componente compreende as obras de engenharia civil das instalações portuárias, pontes, eclusas e canal hidroviário. Nesta tese, não foram considerados a construção (1) do canal, em razão da formação do rio Madeira ser natural; (2) de pontes rodoviárias e/ou ferroviárias e de eclusas por não existirem no trecho do rio em questão.

##### **i. Construção de Instalações Portuárias**

Para a construção das instalações portuárias, adotou-se o processo unitário '*Port facilities {GLO} | market for | Cut-off, U*', que é calculado por meio da Equação 4-9. Conforme é possível observar, esta equação é composta de dois fatores no qual, compreende o (1) produto entre o Inverso do Momento de Transporte Médio da Operação de Transporte ( $1/d$ ) e o quociente entre a Área do Porto de Rotterdam ( $A_R$ ) e a Vida Útil ( $VU$ ); e (2) na soma das áreas dos Terminais Portuários da Hermasa situados em Porto Velho ( $A_{PV}$ ) e outro em Itacoatiara ( $A_I$ ).

O site do Porto de Rotterdam informa que sua área tem mais de 12,60 mil hectares (Porto de Rotterdam, 2024), com um tempo de vida útil ( $t$ ) de 100 anos.

$$y_5 = \left( \frac{1}{d} \times \frac{A_R}{VU} \right) \times (A_{PV} + A_I) \quad \text{Equação 4-9}$$

Em que,

$1/d$  – Inverso do Momento de Transporte Médio da Operação de Transporte;

$A_R$  – Área do Porto de Rotterdam;

$VU$  – Vida Útil;

$A_{PV}$  – Áreas do Terminal da Hermasa; e

$A_I$  – Área do Terminal de Itacoatiara;

A área do terminal da Hermasa em Porto Velho é em torno de 4 (quatro) hectares (Brasil, 2018b), enquanto no terminal situado em Itacoatiara é em torno de 27,0923 hectares (Brasil, 2022a).

#### 4.1.3.2 Operação e Manutenção da Infraestrutura Hidroviária (P<sub>7</sub>)

Este componente compreende a dragagem do canal hidroviário e a operação e manutenção das instalações portuárias. Por ser um canal de fundo arenoso (Dombrow Junior, 2017), faz-se necessário dragar o rio todos os anos.

Na *Ecoinvent*, o processo considerado é o “*Excavation, hydraulic digger {br}/market for / Cut-off, U*”, em que, o cálculo da quantificação dos recursos ( $y_6$ ) foi obtido por meio da Equação 4-10, que consiste no quociente entre o Volume Anual de Material Dragado ( $VD$ ) e o Momento de Transporte Médio da Operação de Transporte ( $d$ ).

$$y_6 = \frac{VD}{d} \quad \text{Equação 4-10}$$

Nesta tese, o volume de material dragado do rio Madeira foi extraído do relatório de Brasil e USACE (2019), no qual, informa que em 2017, o Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT) firmou contrato para dragar o rio Madeira por um período de cinco anos, mantendo a profundidade em 3,5 metros, com uma margem de confiança de 90%, estimando um volume anual de 1,085 milhões de m<sup>3</sup>, o que correspondeu um montante de dois milhões de toneladas de sedimentos por ano.

Para isto, é necessário o uso de duas dragas hidráulicas: uma draga de 18 polegadas com bomba de 900 HP, o que equivale a 820,27 kW, e uma draga de 20 polegadas com bomba de 1.100 HP, o que equivale a 671,13 kW.

Contudo, as características destes equipamentos não foram encontradas no Relatório de Parâmetros dos Equipamentos do SICRO na versão de julho de 2022 (Brasil, 2022b). Diante disto, foi adotado um equipamento similar ao descrito por Brasil e USACE (2019), dado pelo código SICRO E9637 (Brasil, 2024c). Este equipamento é composto por uma draga de sucção e recalque com potência de bomba de 746 kW e de cortador de 110 kW, com um consumo de combustível de 0,15 litros/kWh, e consumo específico de 204,9 g/kWh (Brasil, 2022b), e vazão de recalque de 458 m<sup>3</sup>/hora (Brasil, 2017d). Nesta tese, foi considerado o uso de apenas uma draga.

A quantificação deste processo unitário consistiu no quociente da divisão entre o volume anual de material dragado e o momento de transporte total da hidrovia no ano.

A seguir é tratado do componente de serviço de transportes da Disposição Final da Infraestrutura Hidroviária.

#### 4.1.3.3 Disposição Final da Infraestrutura Hidroviária ( $P_8$ ):

Este componente compreende as trocas ambientais relacionadas ao tratamento de resíduos gerados na infraestrutura hidroviária. Contudo, não foi encontrado na base de dados da *Ecoinvent*, sendo desconsiderado desta tese.

#### **4.1.4 Transporte Rodoviário**

Nesta tese, que conta com cinco cenários – ver capítulo 3.7 (Cenários) –, no qual, o Cenário 1 consiste na piora das condições hidrológicas para a navegação, sendo necessário transportar parte dos grãos por meio do modo rodoviário.

Nesta tese, foi utilizado o processo unitário '*Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {BR}*| *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U*', cuja unidade de medida é o momento de transporte (tkm). Este processo dispõe de características similares do transporte rodoviário da região do Brasil, com capacidade de carregamento acima de 32 toneladas métricas, e tecnologia de motorização EURO5, exigência da legislação ambiental brasileira (Brasil, 2024d).

A composição das entradas consiste na Manufatura e Manutenção da Frota de Caminhões, na Pré-Combustão e Viagem dos Caminhões, e na Construção e Manutenção da Rodovia. Neste processo unitário, são considerados dois tipos de combustíveis: (1) diesel de baixo teor de enxofre; e (2) biodiesel.

As saídas consistem na geração de resíduos, no uso do freio, do caminhão e dos pneus. As emissões para o ar consistem, em sua maioria, os gases oriundos da queima de combustível e lubrificante. A seguir é descrito a Análise de Impacto de Ciclo de Vida.

## 5 ANÁLISE DE IMPACTO

Após a Fase II (Análise de Inventário), tem-se a Fase III (Análise de Impacto) que compreende a descrição da seleção do método de cálculo, das categorias de impacto e do modelo de caracterização e, conseqüentemente, na apresentação dos resultados dos cenários.

Goedkoop *et al.*, (2009) desenvolveram um método de Análise de Ciclo de Vida, conhecido por ReCiPe2009, que fornece Fatores de Caracterização harmonizados nas Categorias de Impacto Intermediário (*Midpoint*) e Final (*Endpoint*). Huijbregts *et al.*, (2017) atualizaram este método, no qual, os Fatores de Caracterização passaram a ser representativos na escala global também.

Nesta tese, com vistas a atender um dos objetivos desta tese, foi adotado o método ‘*ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.07 / World (2010) H*’, utilizado para quantificar as emissões de GEE de forma hierárquica, com abrangência mundial.

A seguir são apresentados os resultados dos serviços de transportes dos comboios de barcaças.

### 5.1 Análise de Impacto Ambiental Unitário

O impacto ambiental unitário consiste no cálculo do quantitativo de  $CO_{2Eq}$  emitidos para transportar uma tonelada em um quilômetro (*tkm*), considerando a composição dos processos unitários dos Serviços de Transportes.

Nesta tese, o *software* SimaPro foi utilizado para calcular o impacto ambiental dos comboios de barcaças e do modo rodoviário, cuja composição dos processos unitários, e seus respectivos valores de Entradas e Saídas, foram previamente revisados visando aderência às características do transporte de grãos por meio do rio Madeira.

No resultado total, ou seja, a soma das emissões unitárias por tkm dos Serviços de Transportes dos modos de transportes considerados nesta tese (rodoviário e hidroviário), a média do impacto ambiental unitário total foi de  $45,37 \text{ gCO}_{2Eq}/tkm$  (Figura 5-1).



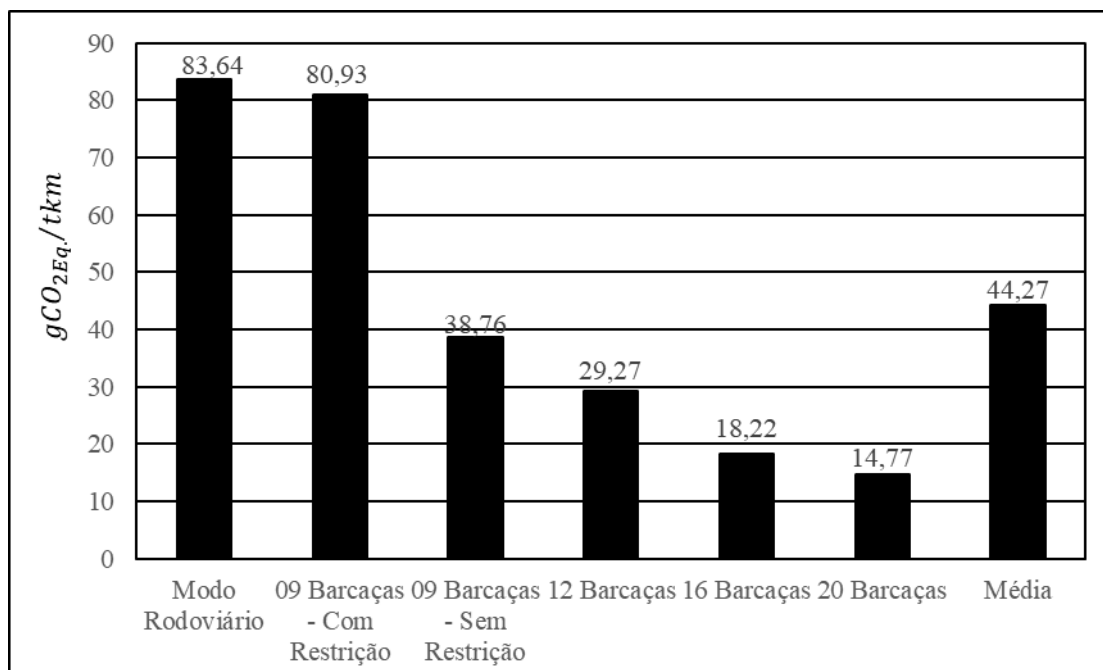


Figura 5-1: Impacto Ambiental Unitário Total por tkm dos Modos de Transportes (Rodoviário e Hidroviário)

O impacto ambiental unitário por tkm do modo rodoviário foi de 83,64  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , sendo este o maior valor da amostra.

O comboio de nove barcaças com restrição no carregamento foi de 80,93  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , 3,24% menor quando comparado com o modo rodoviário. No comboio de nove barcaças sem restrição no carregamento, o impacto ambiental unitário foi de 38,76  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , 53,66% menor que o modo rodoviário.

No comboio de 12 barcaças, o impacto ambiental foi de 29,27  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , no comboio de 16 barcaças foi de 18,22  $gCO_{2Eq.}/tkm$  e no comboio de 20 barcaças foi de 14,77  $gCO_{2Eq.}/tkm$ . Em relação ao modo rodoviário, o impacto ambiental dos comboios de 12, 16 e 20 barcaças são, respectivamente, 65,01%, 78,22% e 82,34% menores.

A seguir, são apresentados os resultados do impacto ambiental unitário dos Serviços de Transportes para os modos de transportes considerados nesta tese.

### 5.1.1 Impacto Ambiental Unitário dos Serviços de Transportes

A Figura 5-2 apresenta a média do impacto ambiental unitário total dos Serviços de Transportes dos modos de transportes considerados nos cenários desta tese (modo rodoviário e hidroviário – comboios de barcaças). Na média, o Serviço de Operação de Transporte foi de 40,98  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , enquanto a média do impacto ambiental unitário

do Serviço de Frota foi de 0,80  $gCO_{2Eq./tkm}$ ) e o Serviço de Infraestrutura 2,99  $gCO_{2Eq./tkm}$ .

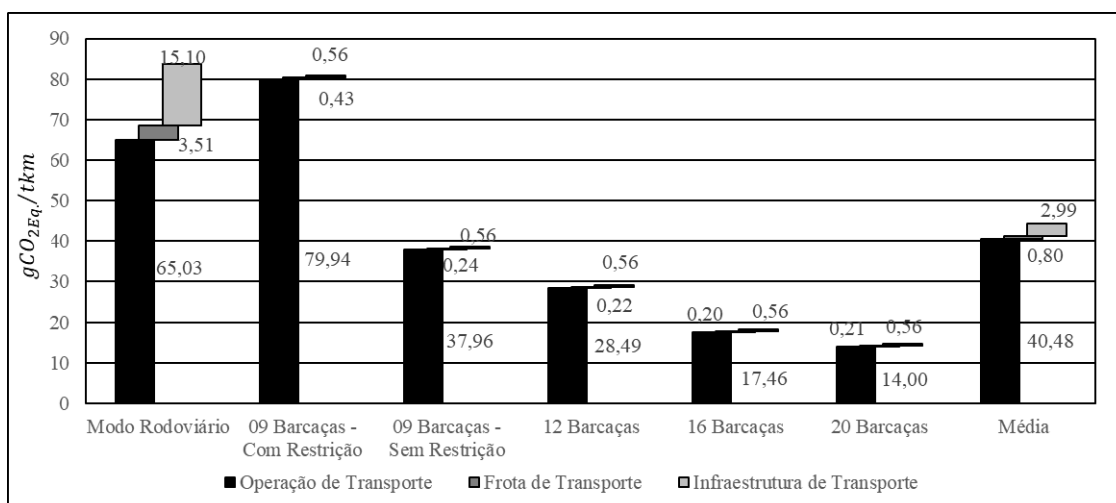


Figura 5-2: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes dos Serviços de Operação de Transporte

Nesta figura, observa-se que o impacto ambiental unitário do Serviço de Operação de Transporte do modo rodoviário é 18,65% menor que o observado no comboio de nove barcoas com restrição de carregamento. Contudo, o impacto ambiental unitário dos Serviços de Frota e de Infraestrutura, do modo rodoviário, foram, respectivamente, quase oito vezes (724,37%) e 25 vezes (2.574,65%) maiores que o observado no comboio de nove barcoas com restrição de carregamento.

O detalhamento dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte encontra-se no capítulo 5.1.1.1 (Impacto Ambiental Unitário dos Componentes de Operação de Transporte), a seguir.

#### 5.1.1.1 Impacto Ambiental Unitário dos Componentes de Operação de Transporte

Conforme já informado, na média, o impacto ambiental unitário total do Serviço de Operação de Transporte foi de 40,478  $gCO_{2Eq./tkm}$ , com o comboio de nove barcoas com restrição ao carregamento apresentando o maior valor de impacto ambiental unitário, com 79,942  $gCO_{2Eq./tkm}$ , e o modo rodoviário 65,033  $gCO_{2Eq./tkm}$ , 18,65% menor (Figura 5-3), o que pode ser justificado pela mistura de biodiesel na composição do combustível, fonte energética menos nociva ao meio ambiente.

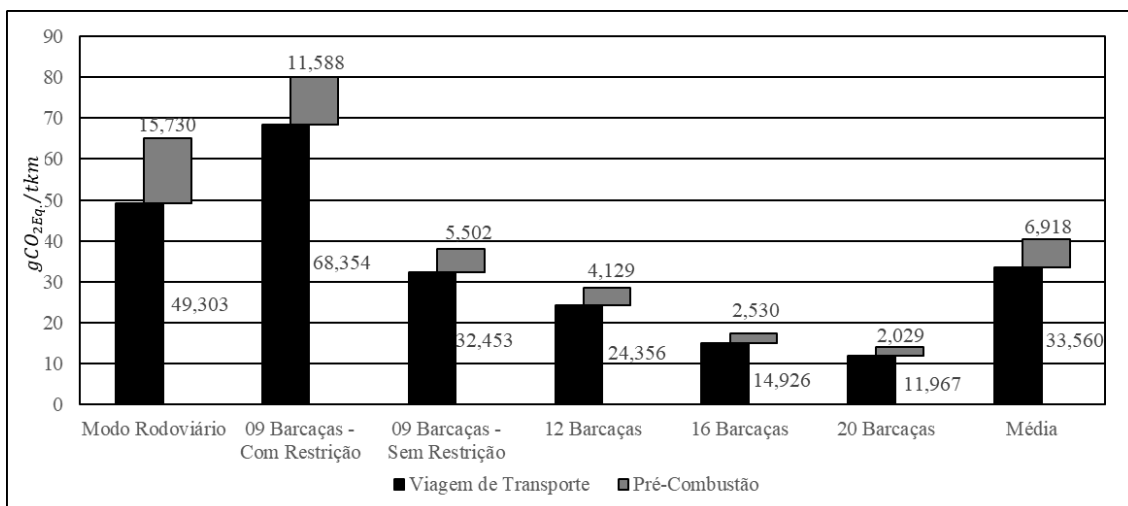


Figura 5-3: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte

No SimaPro, a quantidade de biodiesel considerada foi de apenas 12,00%, e o restante relativo ao diesel. Neste contexto, é possível que esta pequena quantidade de biodiesel na composição do combustível permita ao modo rodoviário uma maior eficiência energética em comparação ao modo hidroviário.

Do impacto ambiental unitário dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do modo rodoviário, o Componente de Viagem de Transporte representou 75,81% (49,303 gCO<sub>2Eq.</sub>/tkm), enquanto 24,19% (15,730 gCO<sub>2Eq.</sub>/tkm) foram do Componente de Pré-Combustão.

No modo hidroviário, o percentual dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte foi igual em todos os comboios de barcaças, dos quais 85,50% foram do Componente de Viagem de Transporte, enquanto o restante (14,50%) do Componente de Pré-Combustão.

O comboio de 20 barcaças foi o que apresentou o menor impacto ambiental unitário no Serviço de Operação de Transporte, o que pode ser justificado pelo menor consumo de combustível e a maior capacidade de carregamento.

#### 5.1.1.2 Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte

Conforme já informado, na média, o impacto ambiental unitário total do Serviço de Frota de Transporte foi de 0,801 gCO<sub>2Eq.</sub>/tkm, com o comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento apresentando o maior valor de impacto ambiental unitário, com

79,942  $gCO_{2Eq./tkm}$ , e o modo rodoviário 65,033  $gCO_{2Eq./tkm}$ , 18,65% menor (Figura 5-3), o que pode ser justificado pela mistura de biodiesel na composição do combustível, fonte energética menos nociva ao meio ambiente.

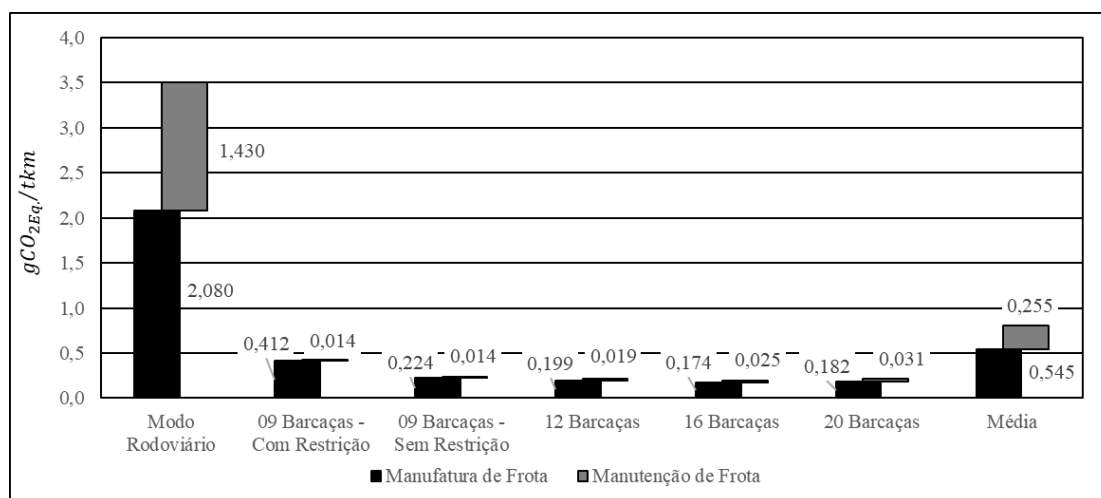


Figura 5-4: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte

No modo rodoviário, o impacto ambiental unitário do Componente de Manufatura da Frota foi 405,01% maior quando comparado com o comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento, enquanto o Componente de Manutenção foi pelo menos dez vezes (10.182,92%) maior.

Por outro lado, no comboio de 20 barcaças, foi o que apresentou o menor impacto ambiental unitário, com o Componente de Manufatura de Frota totalizando 0,182  $gCO_{2Eq./tkm}$ , enquanto o Componente de Manutenção de Frota impactando 0,031  $gCO_{2Eq./tkm}$ .

A seguir, é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Unitário dos Componentes de Serviço de Infraestrutura de Transporte.

### 5.1.1.3 Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte

Na média, o impacto ambiental unitário total deste Serviço de Transporte foi de 2,987  $gCO_{2Eq./tkm}$ , dos quais 2,726  $gCO_{2Eq./tkm}$  é referente ao Componente de Construção da Infraestrutura e o restante (0,261  $gCO_{2Eq./tkm}$ ), é referente ao Componente de Manutenção da Infraestrutura (Figura 5-5).

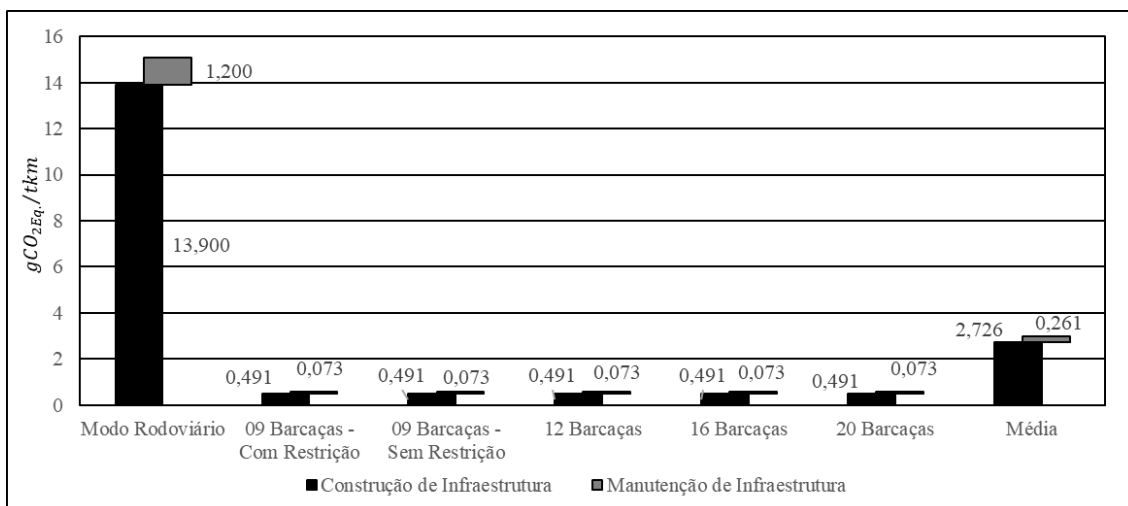


Figura 5-5: Impacto Ambiental Unitário dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte

O modo rodoviário apresentou o maior impacto ambiental unitário neste Serviço de Transporte, um total de 15,100  $gCO_{2Eq.}/tkm$ . Na comparação com o comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento, o modo rodoviário emitiu mais de 25 vezes (2.574,65%). Do total de emissão desse Serviço de Transporte, o Componente de Construção de Infraestrutura representou 92,05% (13,900  $gCO_{2Eq.}/tkm$ ), enquanto o restante 7,94% (1,200  $gCO_{2Eq.}/tkm$ ) está relacionado ao Componente de Manutenção da Infraestrutura.

No modo rodoviário, verifica-se que o Componente de Construção da Infraestrutura representa 92,05% (13,900  $gCO_{2Eq.}/tkm$ ), enquanto a Manutenção da Infraestrutura representa 7,95% (1,200  $gCO_{2Eq.}/tkm$ ), indicando que a construção da infraestrutura rodoviária é mais nociva que sua manutenção.

No caso do modo hidroviário, o impacto ambiental unitário dos Componente de Construção e de Manutenção da Infraestrutura apresentaram valores iguais (Figura 5-5).

A seguir são apresentados os cenários desenvolvidos nesta tese: Cenário-Base e quatro Cenários Hipotéticos.

## 5.2 Análise do Impacto Ambiental do Cenário-Base

O Cenário-Base representa a operação de transporte mais próxima da realidade atual, no qual, a condição hidrológica média adotada foi entre 2013 e 2023. A descrição detalhada deste cenário encontra-se no capítulo 3.7.1 (Construção de Cenário-Base). A seguir são apresentados os resultados do impacto ambiental do THI no Cenário-Base.

### 5.2.1 Impacto Ambiental Total do Cenário-Base

No Cenário-Base, os grãos são transportados utilizando apenas o modo hidroviário. Neste cenário, o THI emitiu um total de 244,873 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 39,07% (95,662 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos na seca, 33,09% (95,662 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) na cheia e o restante (27,85% – 68.190 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) emitidos entre esses períodos (Figura 5-6).

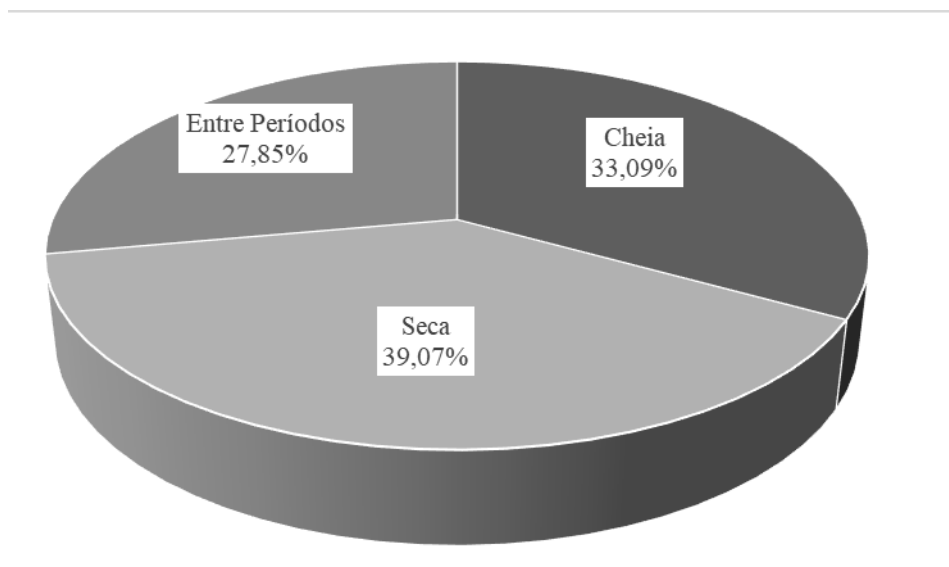


Figura 5-6: Percentual de Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário-Base

Ao longo dos meses de um ano, agosto foi o período de maior acúmulo de  $CO_{2Eq.}$ , um total de 35,524 mil  $tCO_{2Eq.}$ , enquanto janeiro foi o menor, um total de 7,892 mil  $tCO_{2Eq.}$  (Figura 5-7), uma amplitude que variou 27,631 mil  $tCO_{2Eq.}$ .

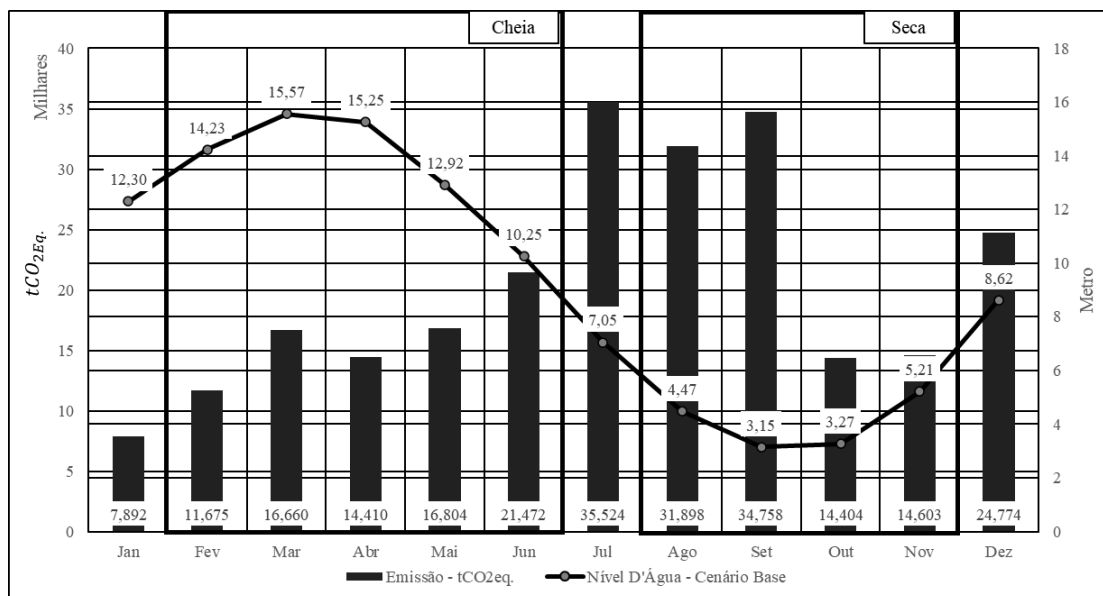


Figura 5-7: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário-Base

Visando maior acurácia nas análises dos resultados, nesta tese, foi calculado o quociente da divisão entre a soma do Impacto Ambiental Total e do momento de transporte total, o que permitiu comparar com a curva de nível d'água do Cenário-Base (Figura 5-8).

Neste gráfico, é possível verificar um aumento do Impacto Ambiental Total por tkm a partir de junho, atingindo seu ponto máximo em setembro, cuja queda se inicia em novembro. Entre agosto e novembro (seca), o nível d'água se encontrou próximo do limite mínimo para a navegação, ficando abaixo desse limite em setembro e outubro, o que levou ao uso de comboios de menor capacidade de carregamento em razão das restrições à navegação devido aos obstáculos inerentes à seca do rio Madeira – surgimento de bancos de areia e de rochas.

Contudo, a curva de nível d'água é uma média das observações diárias. Ou seja, apesar da média de nível d'água ficar abaixo do limite mínimo para a navegação (3,50 metros), imposto pela Marinha do Brasil, é possível que ao longo do mês, o nível d'água encontre-se acima desse limite mínimo, permitindo, desta forma, o transporte de grãos por hidrovia de interior.

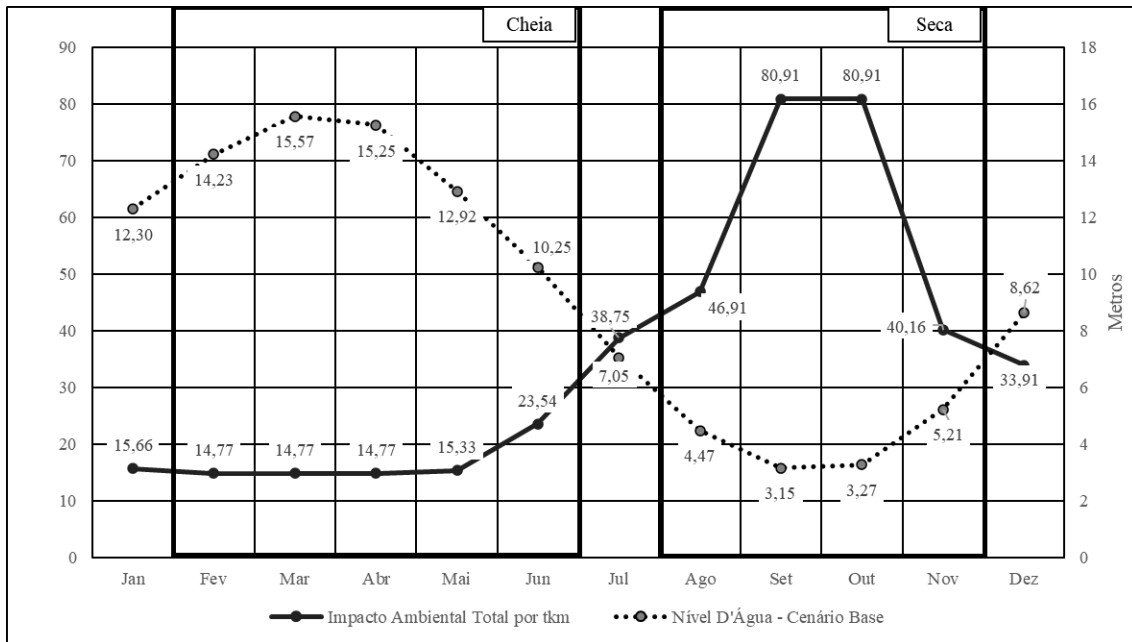


Figura 5-8: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário-Base

Nesta tese, com vistas a trazer novas análises, foi plotado um gráfico contendo a curva de Impacto Ambiental Total por tkm e o percentual de grãos transportados por comboio de barcaças (Figura 5-9).

Nesta figura, verifica-se que, na cheia, a curva de Impacto Ambiental Total por tkm permanece inalterada entre fevereiro e abril, com os grãos sendo transportados pelo comboio de 20 barcaças. A partir de maio, 16,13% (163,692 mil toneladas) do total de grãos foram transportados por meio do comboio de 16 barcaças, e o restante pelo comboio de 20 barcaças, o que levou ao aumento do Impacto Ambiental Total por tkm em 3,77%.

Em junho, os grãos foram transportados por três comboios de barcaças distintos, com prevalência do comboio de 16 barcaças (63,33%), o comboio de 12 barcaças (23,33%) e o comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento (13,33%).

Em julho, os grãos foram transportados exclusivamente pelo comboio de nove barcaças sem restrição à navegação. Contudo, em agosto, 80,65% (584,341 milhões de toneladas) foram transportados por meio do comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento e o restante (19,35% - 131,602 milhões de toneladas) foram transportados pelo comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento, o que levou ao aumento de 21,06% no Impacto Ambiental Total por tkm na comparação com julho.

Em setembro e outubro, os grãos foram transportados exclusivamente pelo comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento devido aos baixos níveis d'água, cujo Impacto Ambiental Total por tkm atingiu seu maior valor no ano (80,91



$gCO_{2Eq./tkm}$ ), um aumento de 447,68% em relação ao valor dos meses entre fevereiro e abril, período em que as condições de navegação se encontram favoráveis ao uso do comboio de 20 barcaças.

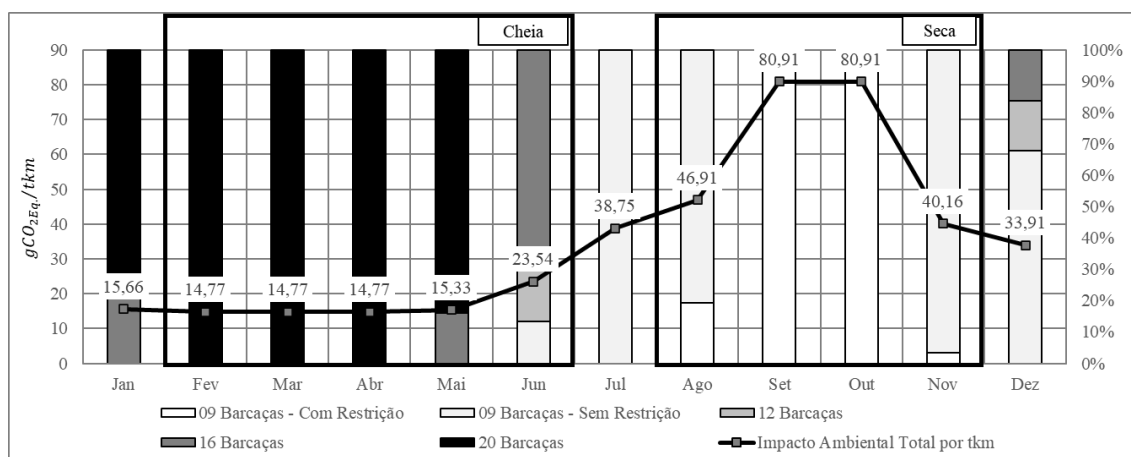


Figura 5-9: Curva do Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados por Comboio de Barcaças do Cenário-Base

A seguir é analisado detalhada do impacto ambiental dos Serviços de Transportes dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base.

### 5.2.1.1 Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário-Base

No que se refere ao Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes no Cenário-Base, o Serviço de Operação de Transporte respondeu por 97,15% (237,896 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por apenas 2,85% (6,977 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total (Figura 5-10).

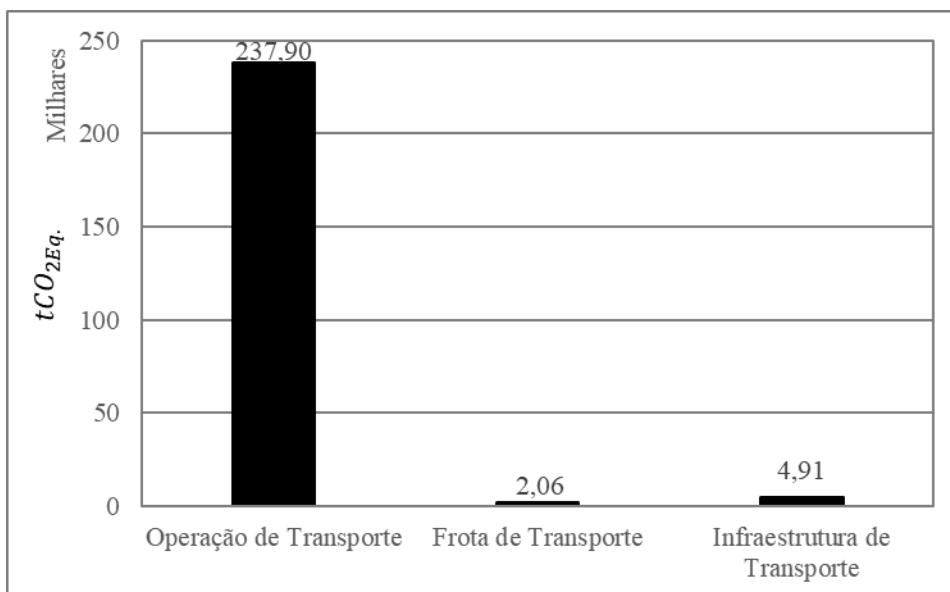


Figura 5-10: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes do Cenário-Base

No que se refere aos comboios de barcaças, o comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento respondeu por 24,83% (60,790 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), dos quais, 98,78% (60,046 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados no Serviço de Operação de Transporte, e o restante, 1,22% (743,87  $tCO_{2Eq.}$ ), foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transporte (Figura 5-11).

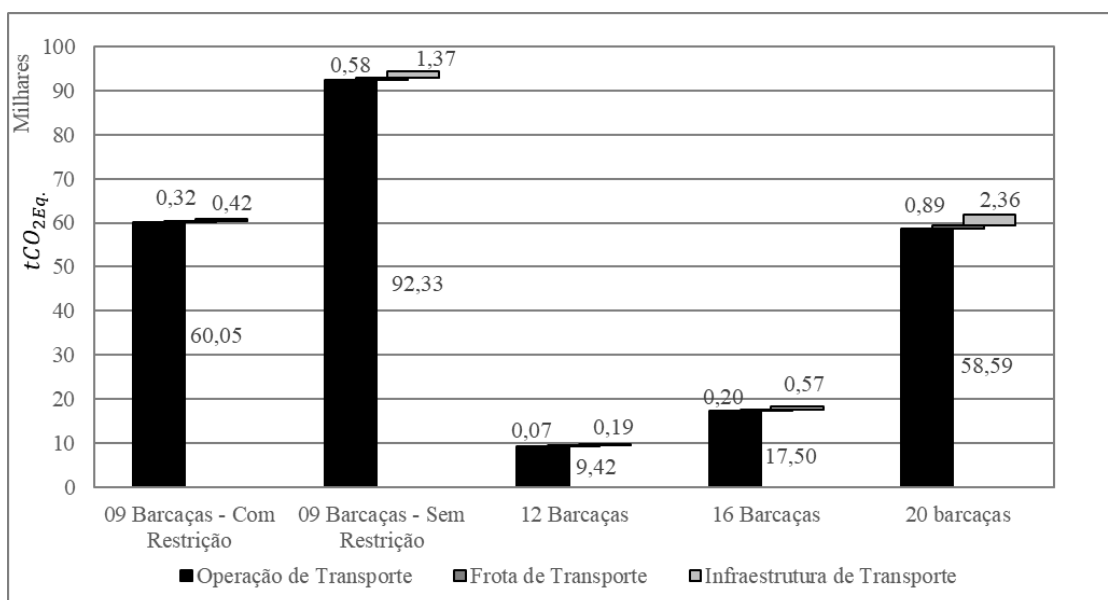


Figura 5-11: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

O comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento foi o que mais gerou  $CO_{2Eq.}$ , respondendo por 38,50% (94,285 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total emitido no Cenário-Base, dos quais, 97,93% (92,333 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados no Serviço de Operação de

Transporte, e o restante, 2,07% (1,952 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transporte

O comboio de 12 barcaças foi o que teve o menor impacto ambiental total do Cenário-Base, respondeu por 3,95% (9,680 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total, dos quais 97,33% (9,421 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram geradas pelo Serviço de Operação de Transportes, enquanto o restante, 2,67% (258,82 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

O impacto ambiental total do comboio de 16 barcaças representou 7,46% (18,268 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total, dos quais 95,81% (17,502 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram geradas pelo Serviço de Operação de Transportes, enquanto o restante, 4,19% (765,48  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

Por fim, o impacto ambiental total do comboio de 20 barcaças representou 25,26% (61,848 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total, dos quais 94,73% (58,592 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram geradas pelo Serviço de Operação de Transportes, enquanto o restante, 5,27% (3,256 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental dos Componentes do Serviço de Operação de Transportes.

***i. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário-Base***

Do Impacto Ambiental do Serviço de Operação de Transporte em relação ao Impacto Ambiental Total, o Componente de Viagem de Transporte representou 83,07% (203,412 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Viagem de Transporte, e o restante, 14,08% (34,484 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Pré-Combustão (Figura 5-12).

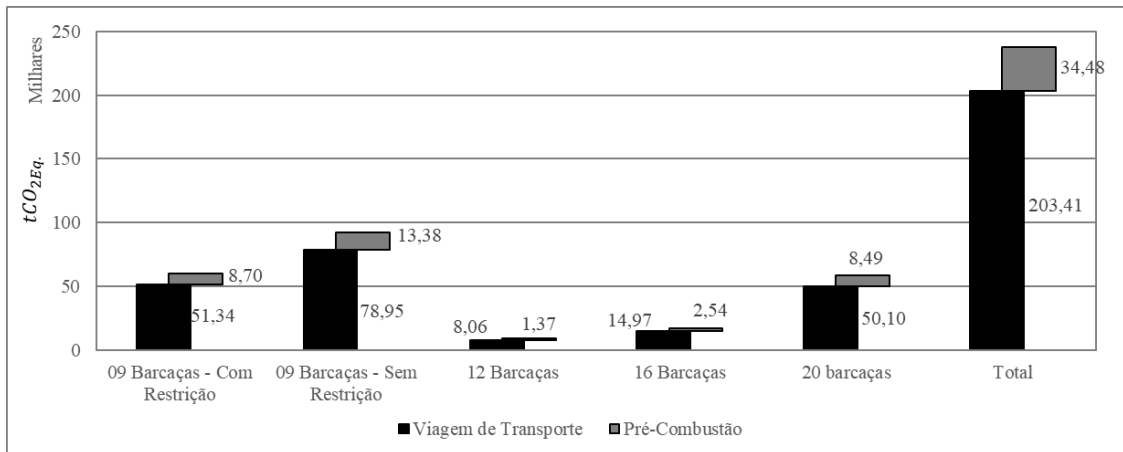


Figura 5-12: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário-Base

Nos Componentes dos Serviços de Operação de Transportes, observa-se que os comboios de menor capacidade de carregamento apresentaram maior valor para o quociente da divisão entre o impacto ambiental do Componente de Serviço de Operação de Transporte e o Impacto Ambiental Total do comboio de barcaças observado (Figura 3-13 e Figura 3-14).

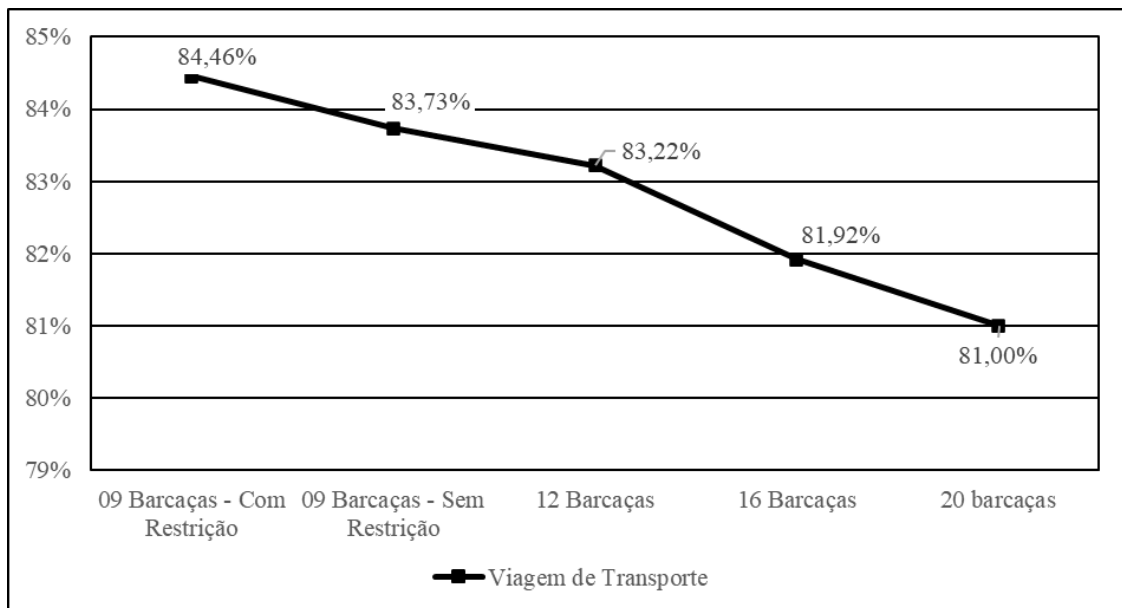


Figura 5-13: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Viagem de Transporte dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

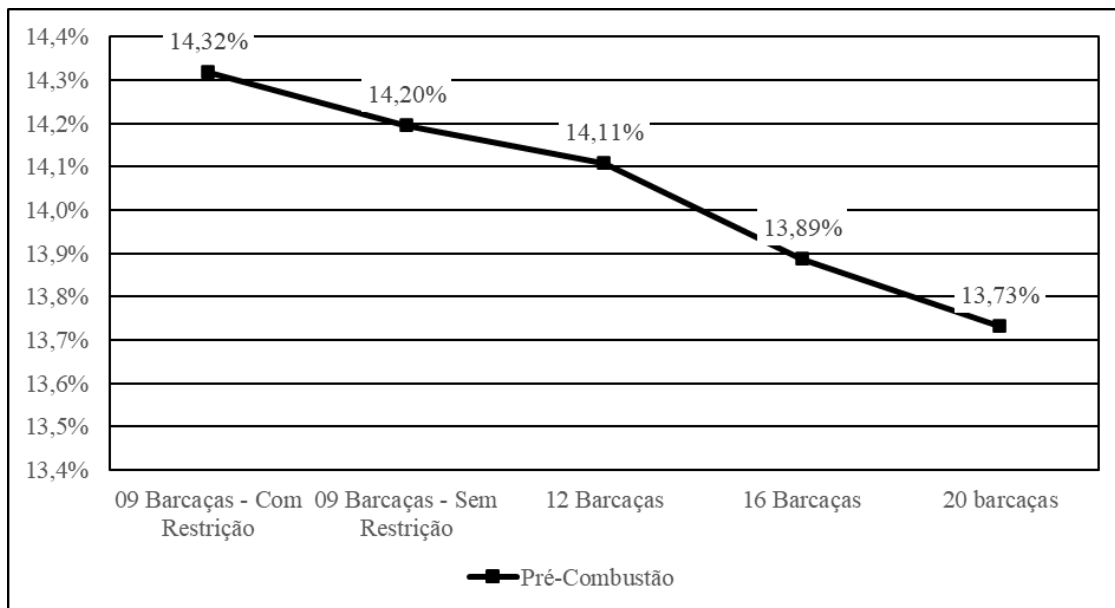


Figura 5-14: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Pré-Combustão dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte.

**ii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário-Base**

No que se refere ao Impacto Ambiental do Serviço de Frota de Transporte em relação ao Impacto Ambiental Total, o Componente de Manufatura de Frota respondeu por 0,76% (1,858 mil  $tCO_2Eq.$ ), enquanto o Componente de Manutenção de Frota respondeu por 0,08% (204,57  $tCO_2Eq.$ ), previsto na Figura 5-15.

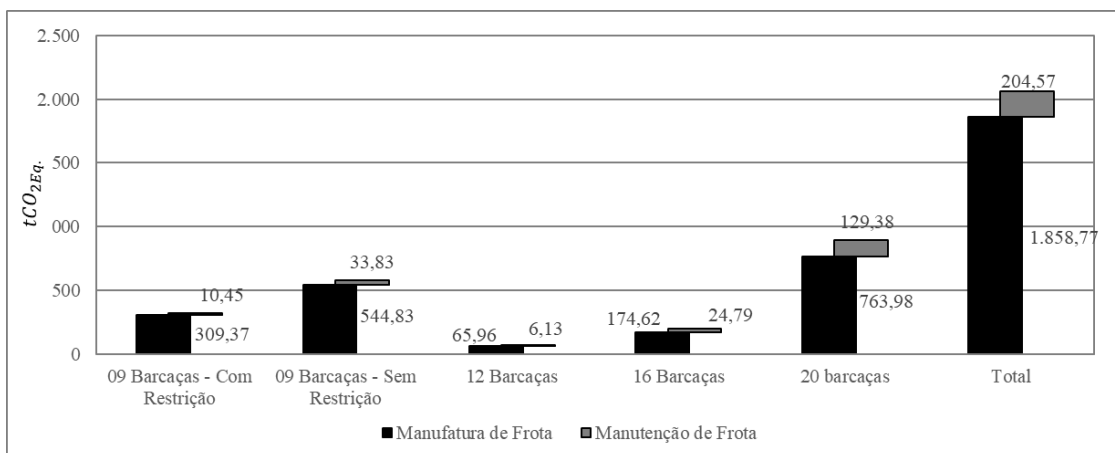


Figura 5-15: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário-Base

Ao contrário do que aconteceu com os Componentes do Serviço de Operação de Transporte, o percentual do quociente da divisão entre o impacto ambiental dos Componente de Frota de Transporte e o Impacto Ambiental Total de um comboio de barcaça apresenta comportamento proporcional à capacidade de carregamento, ou seja, quanto maior a capacidade de carregamento maior será o percentual de impacto ambiental do Componente dos Serviços de Frota de Transporte do comboio de barcaças observado (Figura 5-16 e Figura 5-17).

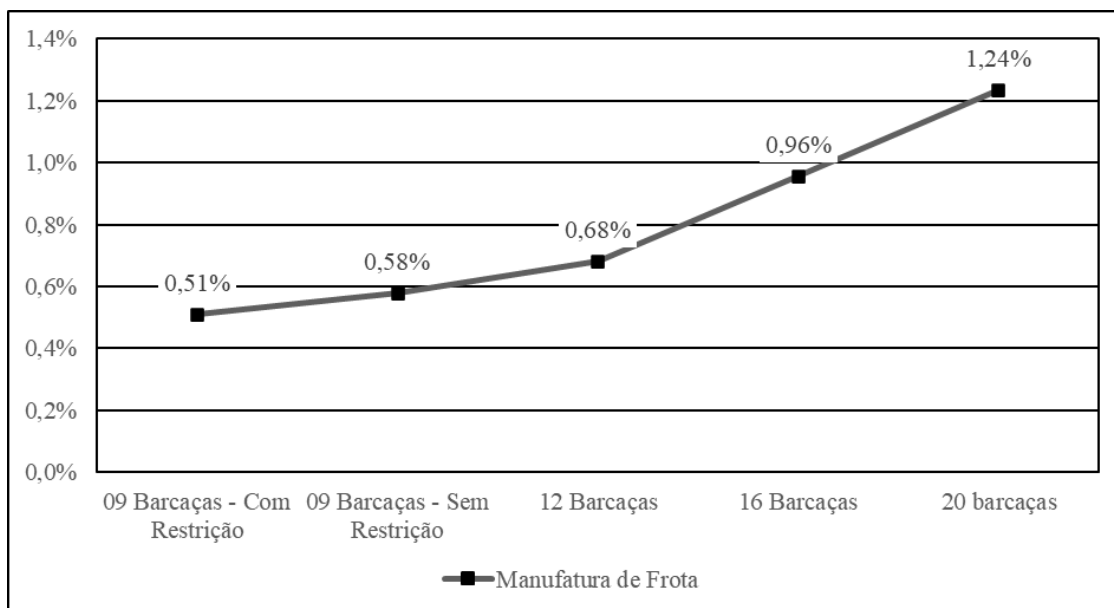


Figura 5-16: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manufatura de Frota dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

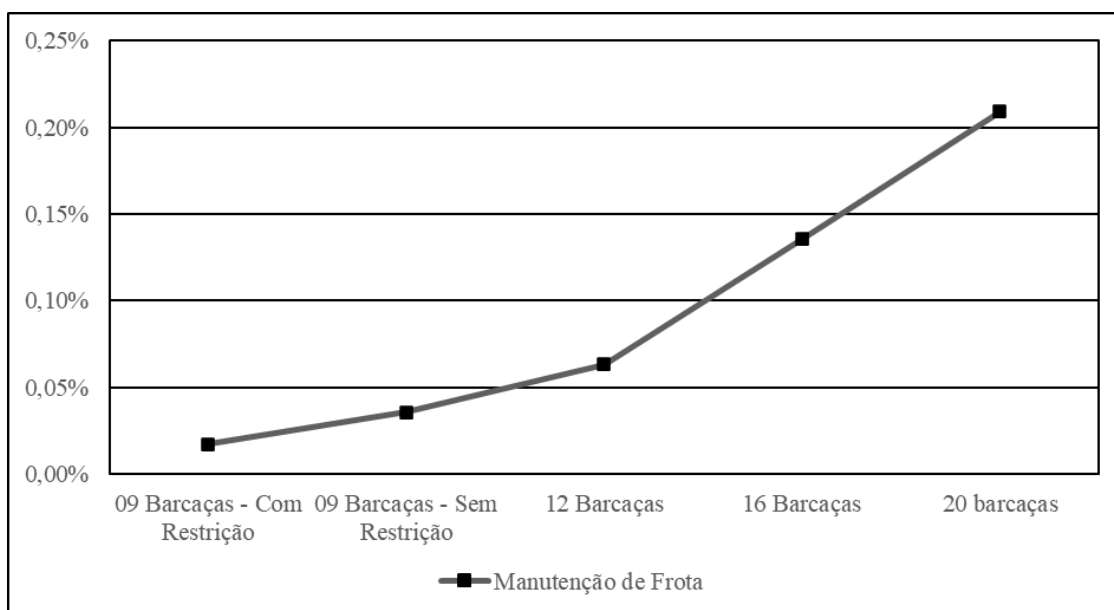


Figura 5-17: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manutenção de Frota dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte.

**iii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário-Base**

No que se refere ao Impacto Ambiental Total do Serviço de Infraestrutura de Transporte, o Componente de Construção de Infraestrutura respondeu por 1,75% (4,276 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), enquanto o Componente de Manutenção de Infraestrutura respondeu por 0,26% (637,47  $tCO_{2Eq.}$ ), previsto na Figura 5-18.

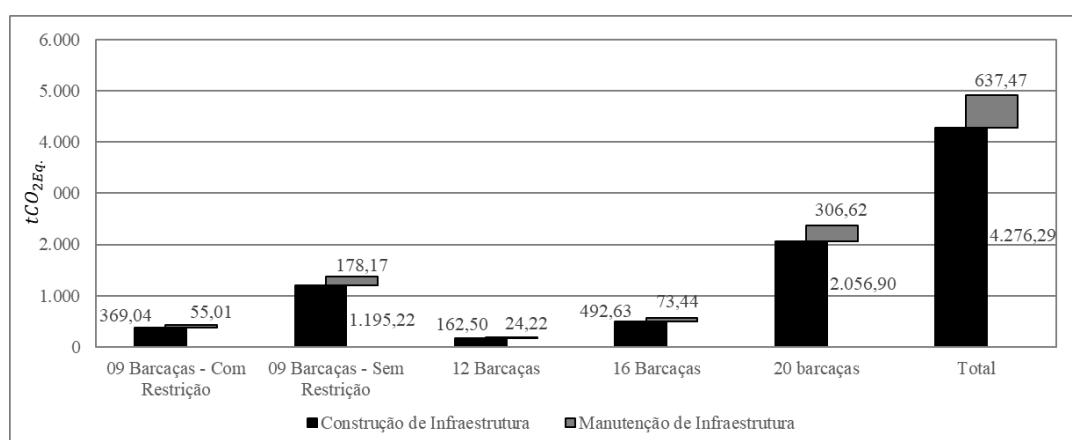


Figura 5-18: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário-Base

Os Componentes Infraestrutura de Transporte têm o mesmo comportamento observado do Componente Frota de Transporte, no qual, o percentual do quociente da divisão entre o impacto ambiental do Componente de Infraestrutura de Transporte e o Impacto Ambiental Total de um comboio de barcaça apresenta comportamento proporcional à capacidade de carregamento, ou seja, quanto maior a capacidade de carregamento maior será o percentual de impacto ambiental do Componente dos Serviços de Infraestrutura de Transporte do comboio de barcaças observado (Figura 5-19 e Figura 5-22).

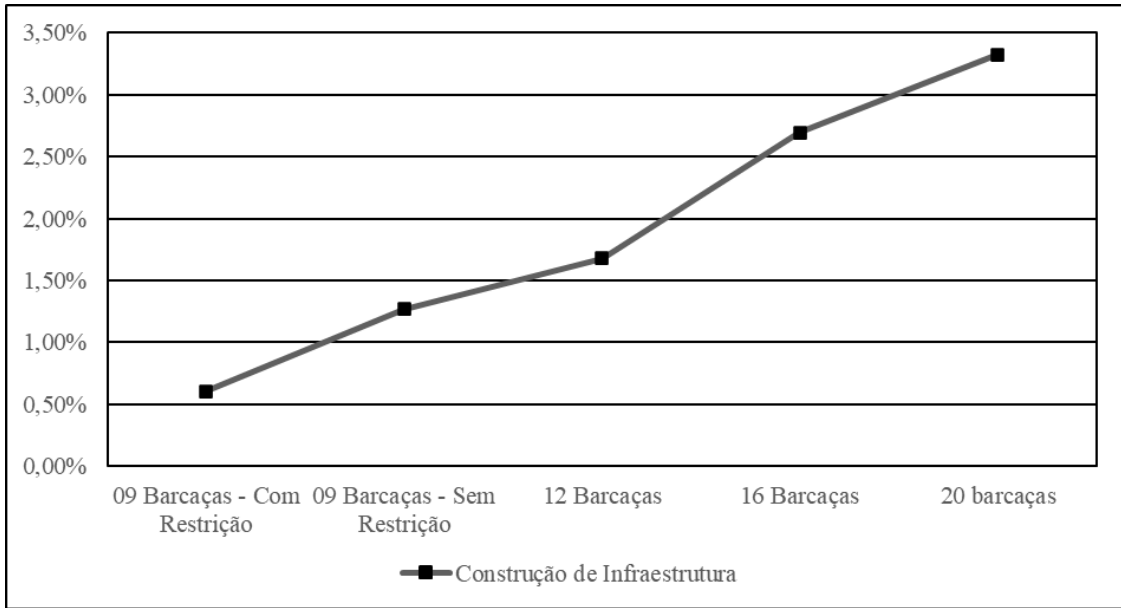


Figura 5-19: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Construção de Infraestrutura dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

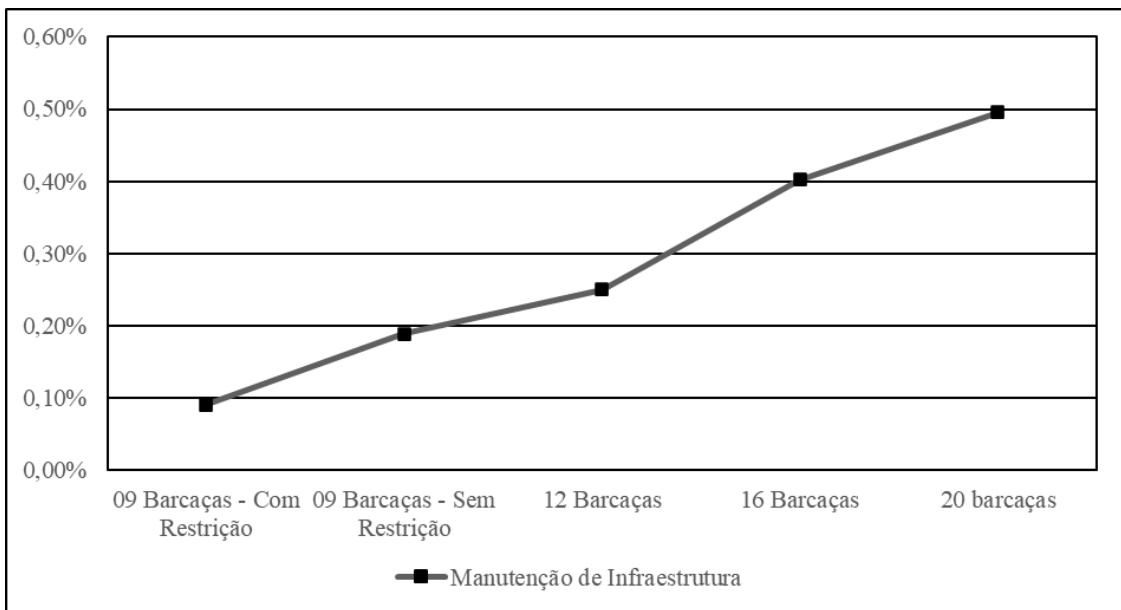


Figura 5-20: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manutenção de Infraestrutura dos Comboios de Barcaças do Cenário-Base

A seguir é apresentado o impacto ambiental dos Cenários Hipotéticos.



### 5.3 Impacto Ambiental dos Cenários Hipotéticos

#### 5.3.1 Impacto Ambiental Total do Cenário 1

Conforme descrito no capítulo 3.7.2 (Construção de Cenários Hipotéticos), este cenário consiste na redução em 72% da vazão d'água, o que tem implicações diretas no transporte de grãos por hidrovia de interior. Neste cenário, o nível d'água ficou abaixo de 3,5 metros de profundidade, entre julho e novembro, sendo proibida a navegação pela Marinha do Brasil (Brasil, 2018a).

Conforme informado no capítulo 3.7.2.1 (Cenário 1), em razão da proibição da navegação no rio Madeira, os grãos migraram para o modo rodoviário, cujo embarque ocorreu em Sorriso/MT, município de maior produção de grãos do estado, com destino ao porto de Santarém/PA, por meio da BR-163, uma distância aproximada de 1375 km (Brasil, 2017a).

Neste cenário, o transporte de grãos emitiu um total de 488,795 mil  $tCO_{2Eq.}$ , um aumento de 99,61% na comparação com o Cenário-Base. Do Impacto Ambiental Total do Cenário 1, 28,25% (138,104 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos na seca, 41,22% (201,488 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) na cheia e o restante (30,52% – 149,202 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) emitidos entre esses períodos (Figura 5-21).

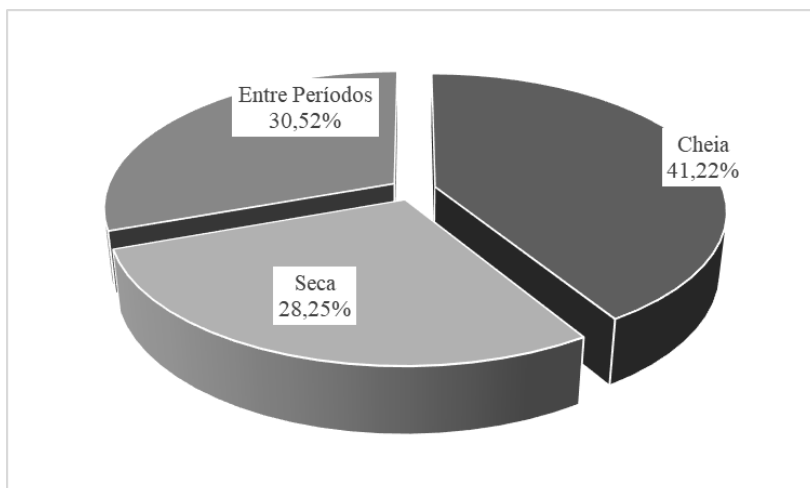


Figura 5-21: Percentual de Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 1

No Cenário 1, julho foi o período de maior Impacto Ambiental Total, representando 15,55% (76,021 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total de impacto ambiental no ano. Contudo, março foi o período de maior movimentação de grãos (12,96% - 1,127 bilhão de toneladas), com Impacto Ambiental Total de 43,704 mil  $tCO_{2Eq.}$ , representando 8,94% do total anual (Figura 5-22).

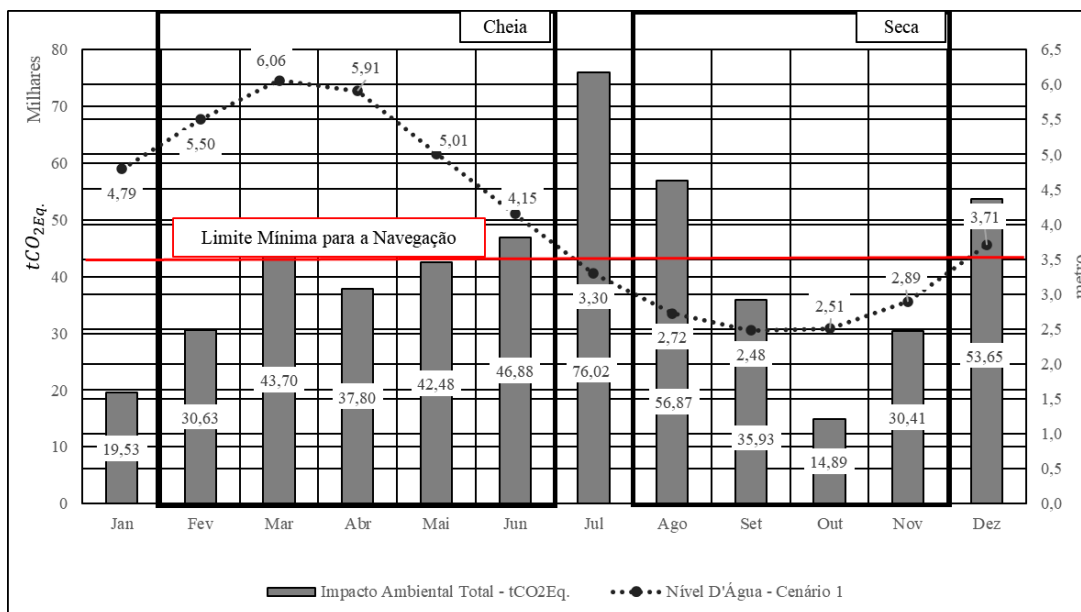


Figura 5-22: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível d'Água no Cenário 1

Considerando o Impacto Ambiental Total por tkm (Figura 5-23), verifica-se uma tendência de aumento nas emissões de  $CO_{2Eq}$  por tkm a partir de junho, atingindo seu ponto máximo em agosto ( $83,64 \text{ gCO}_{2Eq}/tkm$ ), e permanência até novembro.

Neste cenário, o nível d'água ficou abaixo de 3,5 metros de profundidade entre julho e novembro, momento em que houve uma migração dos grãos para o modo rodoviário, o que justifica o aumento do Impacto Ambiental Total por tkm nesse período (Figura 5-24).

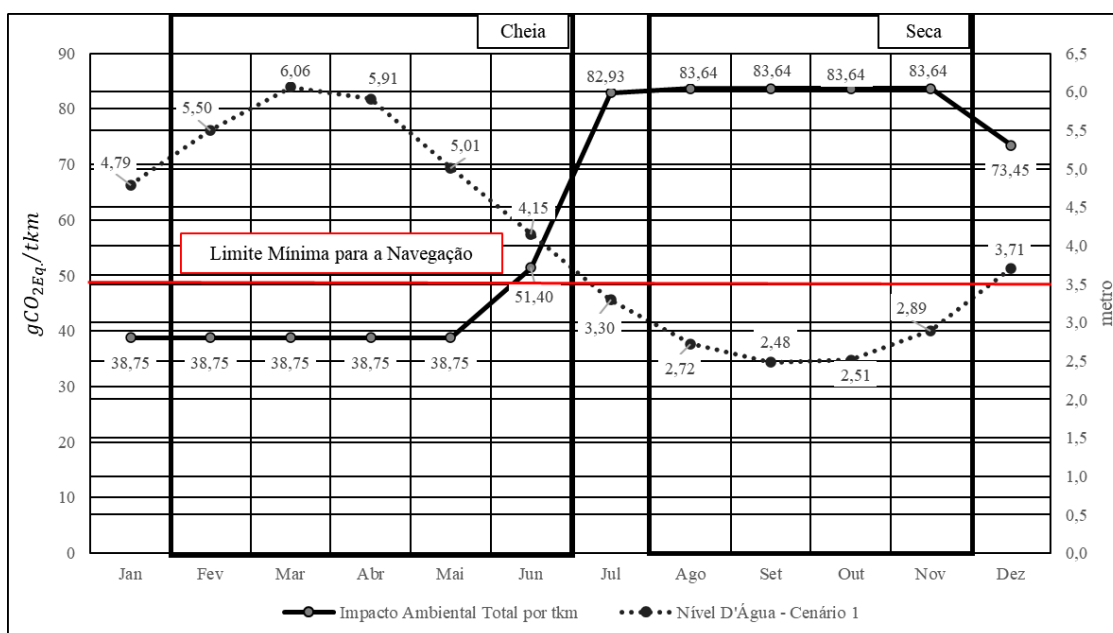


Figura 5-23: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário 1

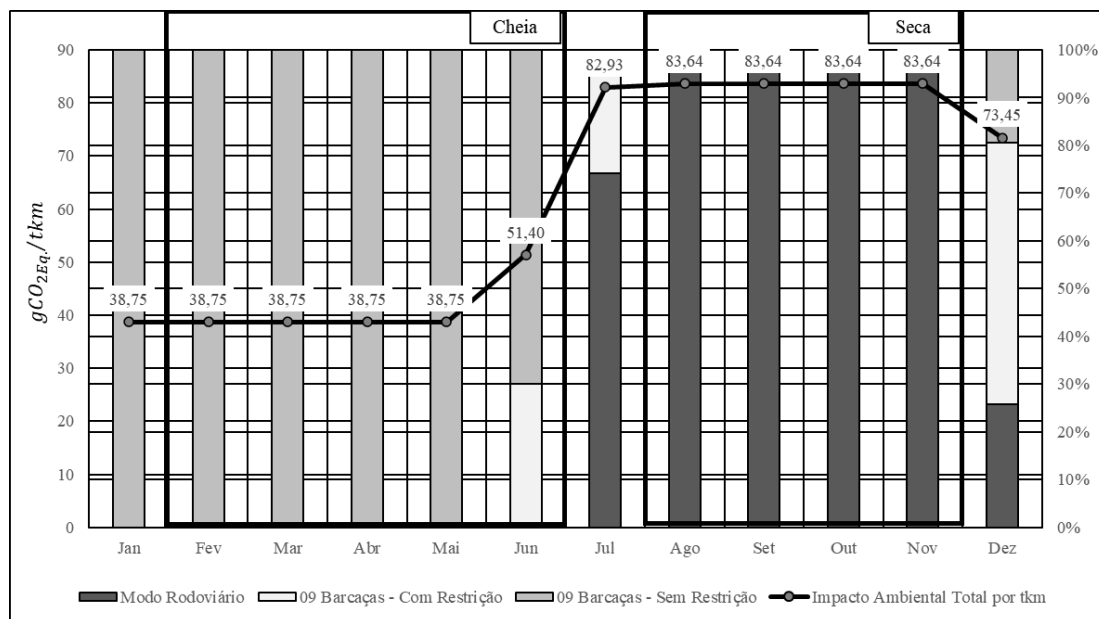


Figura 5-24: Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados por Modo de Transporte do Cenário 1

A seguir é analisado o Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 1.

### 5.3.1.1 Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 1

Neste cenário, o Impacto Ambiental dos Serviços de Operação de Transporte representou 89,36% (436,770 mil  $tCO_{2Eq}$ ) do total emitido, enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por apenas 10,64% (52,024 mil  $tCO_{2Eq}$ ) do total (Figura 5-25).

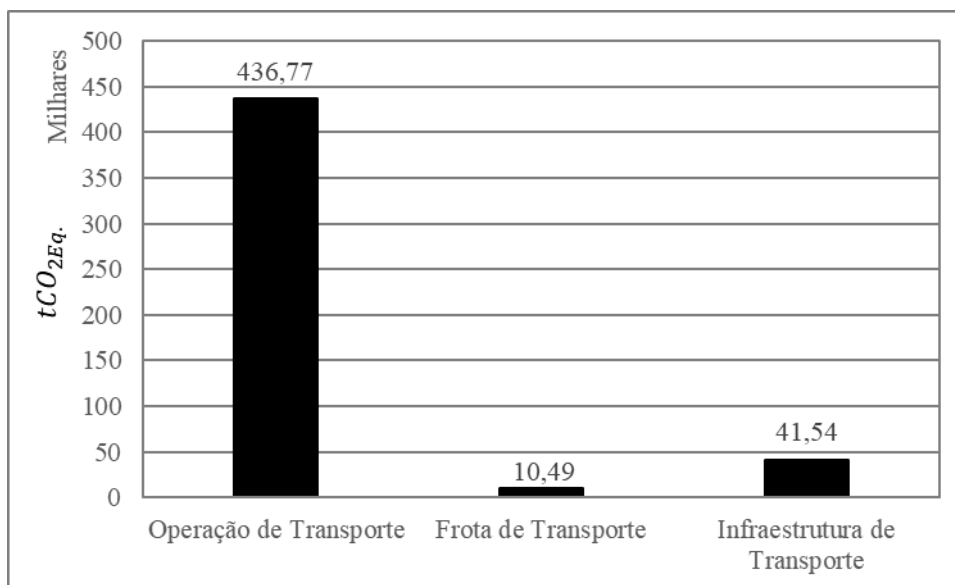


Figura 5-25: Impacto Ambiental Total do Cenário 1

No que se refere o Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte dos modos de transportes, o modo rodoviário respondeu por 43,12% (210,756 mil tCO<sub>2</sub>Eq.), dos quais, 77,75% (163,864 mil tCO<sub>2</sub>Eq.) foram gerados pelo Serviço de Operação de Transporte, enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte representaram, respectivamente, 4,20% (8,844 mil tCO<sub>2</sub>Eq.) e 18,05% (38,047 tCO<sub>2</sub>Eq.), previsto na Figura 5-26.

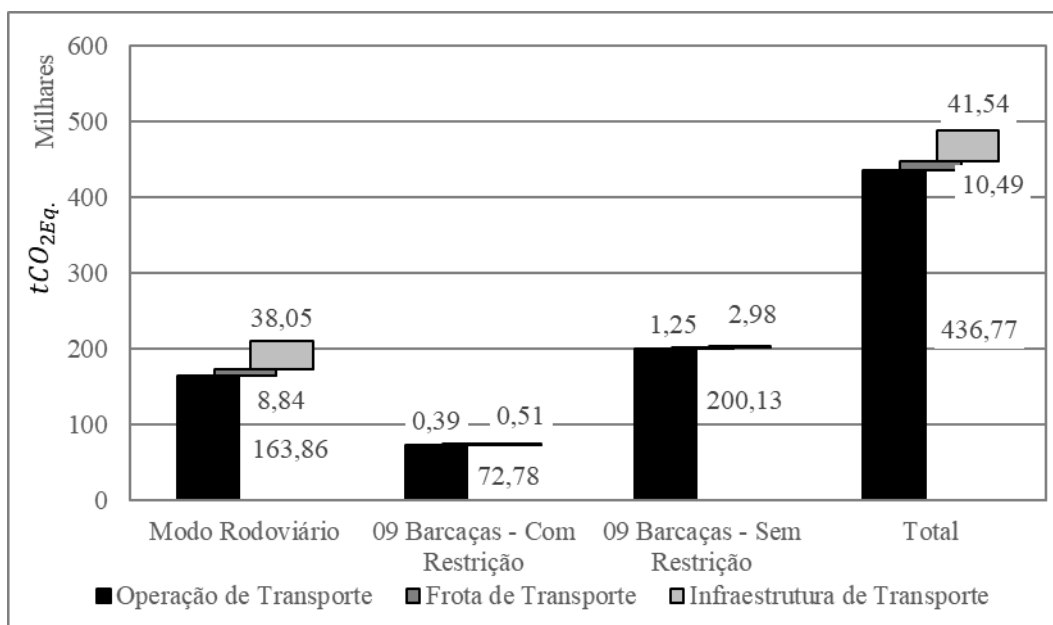


Figura 5-26: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte do Cenário 1

O comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento emitiu um total de 73,681 mil tCO<sub>2</sub>Eq., representando 15,07% do Impacto Ambiental Total deste cenário.

Desse total, o Serviço de Operação de Transporte representou 98,78% (72,779 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), e o restante (1,22% - 901,61  $tCO_{2Eq.}$ ) foi emitido pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

Por fim, o comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento representou 41,81% (204,357 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do Impacto Ambiental Total do Cenário 1, dos quais 97,93% (200,127 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram geradas pelo Serviço de Operação de Transportes, enquanto o restante (2,07% - 4,230 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes de Serviço de Transporte do Cenário 1.

***i. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 1***

Do Impacto Ambiental Total do comboio de barcaça observado, o Componente Viagem de Transporte representou 73,15% (357,576 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), enquanto o Componente Pré-Combustão representou 16,20% (79,194 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), previsto na Figura 5-27.

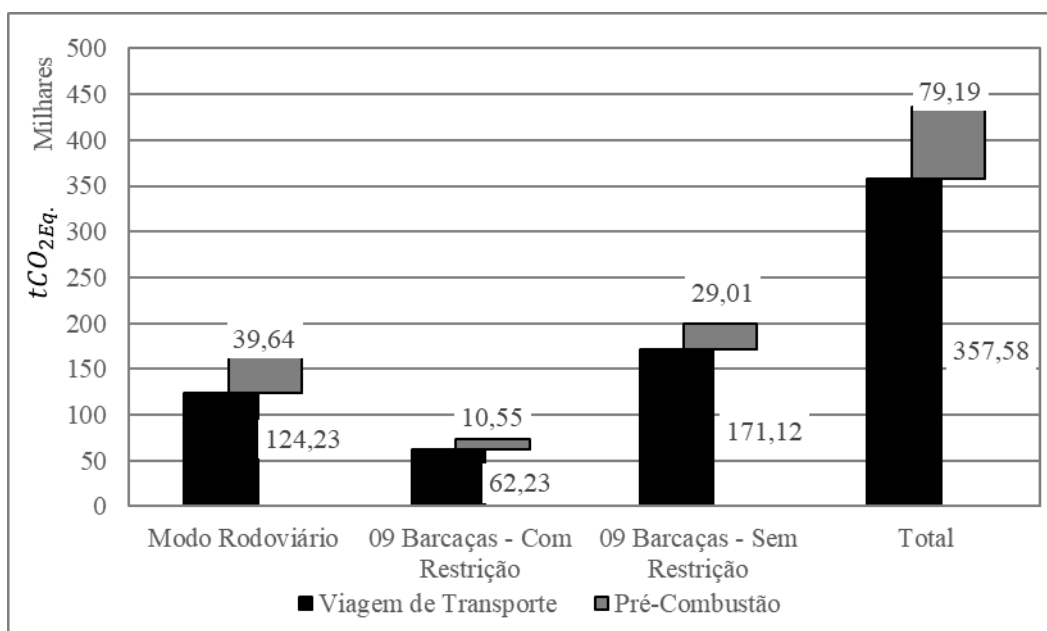


Figura 5-27: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 1

Nos Componentes dos Serviços de Frota de Transportes, observa-se que o modo rodoviário tem o maior percentual de impacto ambiental do Componente Viagem de Transporte em relação ao Impacto Ambiental Total deste modo de transporte, o que pode ser justificado pela mistura de biodiesel no combustível. No caso do modo hidroviário, o aumento da capacidade de carregamento permitiu que esse percentual reduzisse, indicando uma possível relação com a capacidade de carregamento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 5-29).

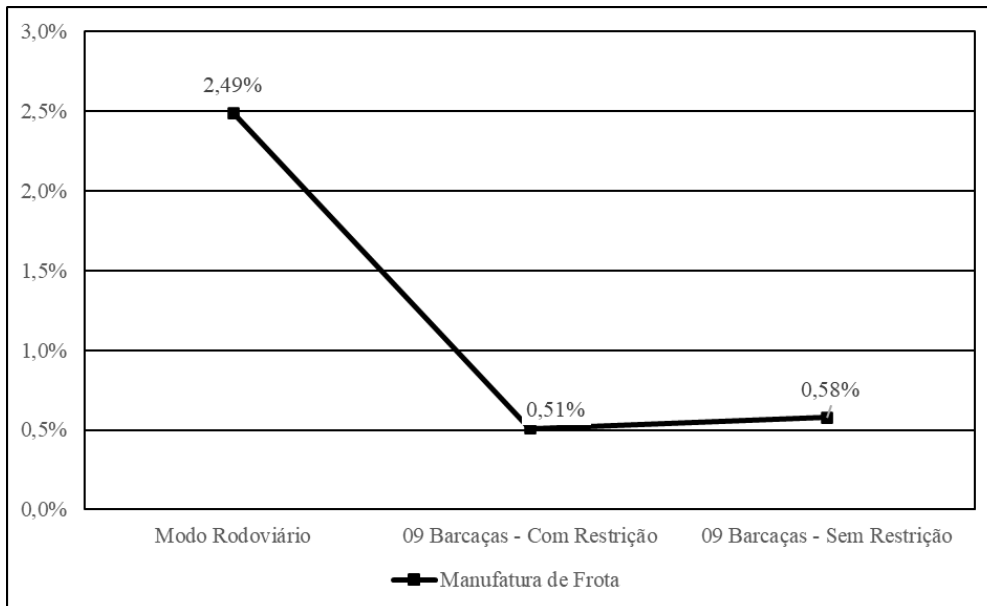


Figura 5-28: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Viagem de Transporte do Cenário 1

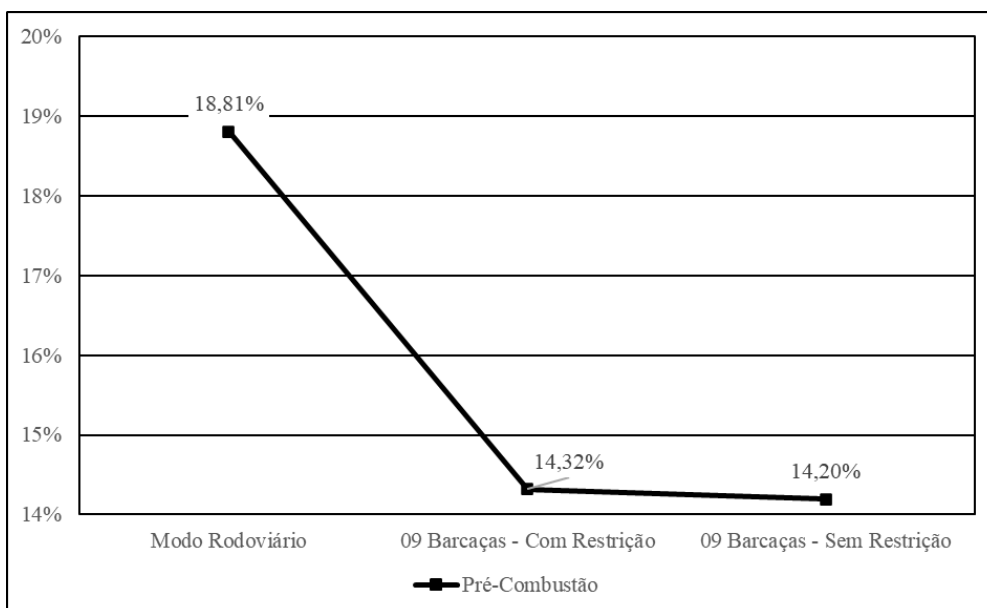


Figura 5-29: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Pré-Combustão do Cenário 1

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 1.

**ii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 1**

Do Impacto Ambiental Total do comboio de barça observado, o Componente Manufatura de Frota respondeu por 1,39% (6,796 mil  $tCO_2Eq.$ ), enquanto o Componente Manutenção de Frota respondeu por 0,75% (3,689 mil  $tCO_2Eq.$ ), previsto na Figura 5-30.

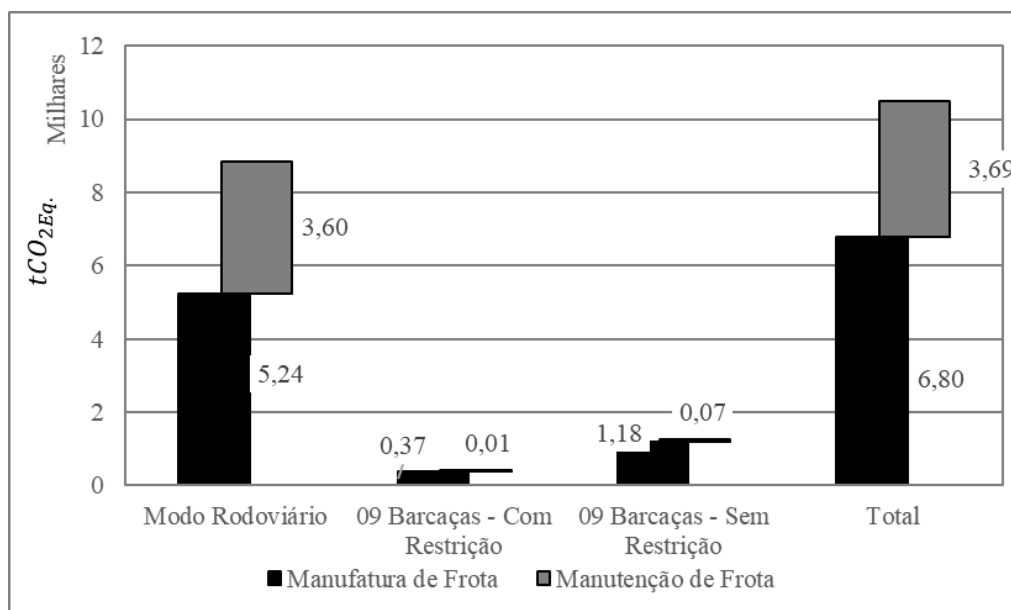


Figura 5-30: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 1

Ao contrário do que aconteceu com os Componentes do Serviço de Operação de Transporte, o modo rodoviário foi o que apresentou o maior percentual do quociente da divisão entre o impacto ambiental dos Componente de Frota de Transporte e o Impacto Ambiental Total, enquanto o modo hidroviário apresentou comportamento que indica uma certa proporcionalidade com a capacidade de carregamento (Figura 5-31 e Figura 5-32).

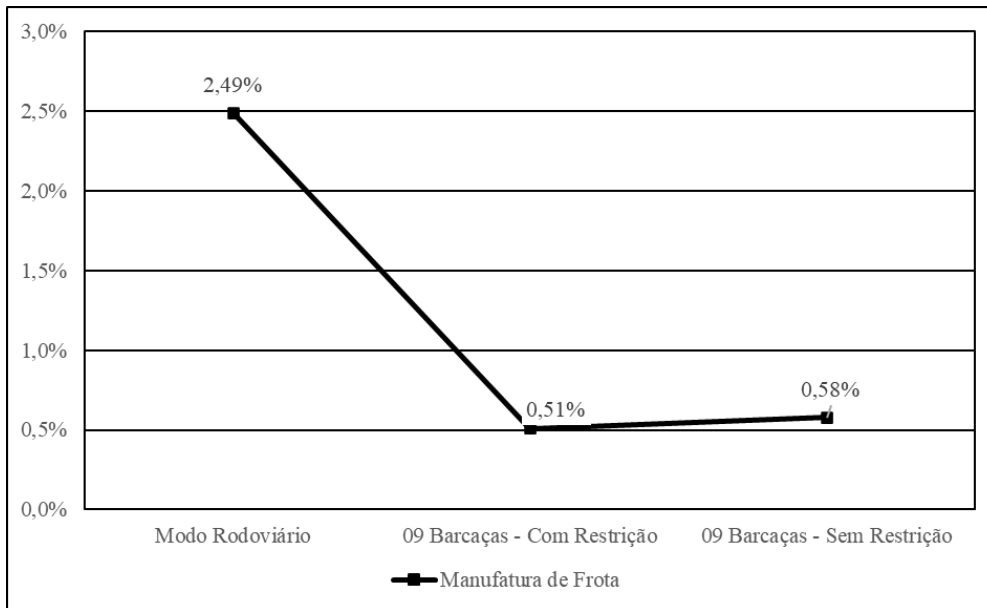


Figura 5-31: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manufatura de Frota do Cenário 1

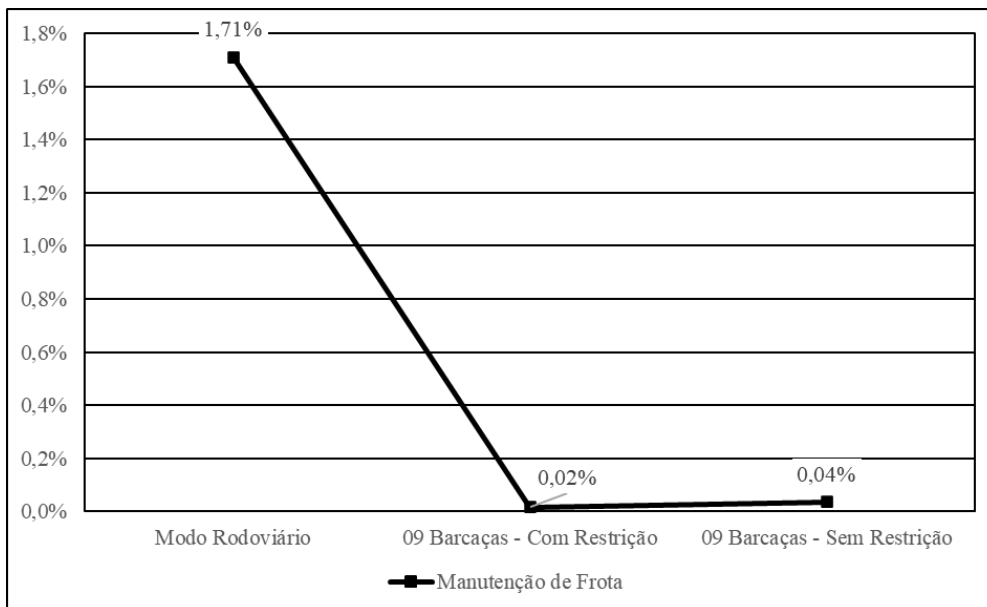


Figura 5-32: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manutenção de Frota do Cenário-Base

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 1.



**iii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 1**

Do Impacto Ambiental Total do comboio de barcaça observado, o Componente Construção de Infraestrutura respondeu por 7,79% (38,062 mil  $tCO_2Eq.$ ), enquanto o Componente Manutenção de Infraestrutura respondeu por 0,71% (3,476  $tCO_2Eq.$ ), previsto na Figura 5-33.

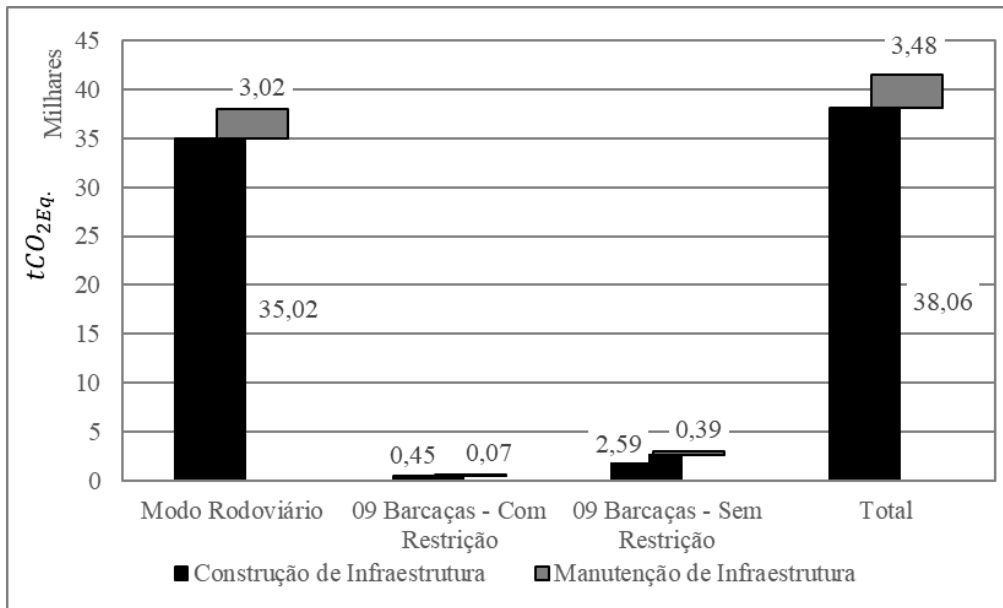


Figura 5-33: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 1

Os Componentes dos Serviços de Infraestrutura de Transporte têm o mesmo comportamento observado dos Componentes dos Serviços de Frota de Transporte, no qual, o percentual do quociente da divisão entre o impacto ambiental dos respectivos Componente de Serviços de Transporte e o Impacto Ambiental Total do modo rodoviário é maior que que o modo hidroviário. Contudo, no modo hidroviário, este percentual indica que há uma certa proporcionalidade com a capacidade de carregamento (Figura 5-34 e Figura 5-35).

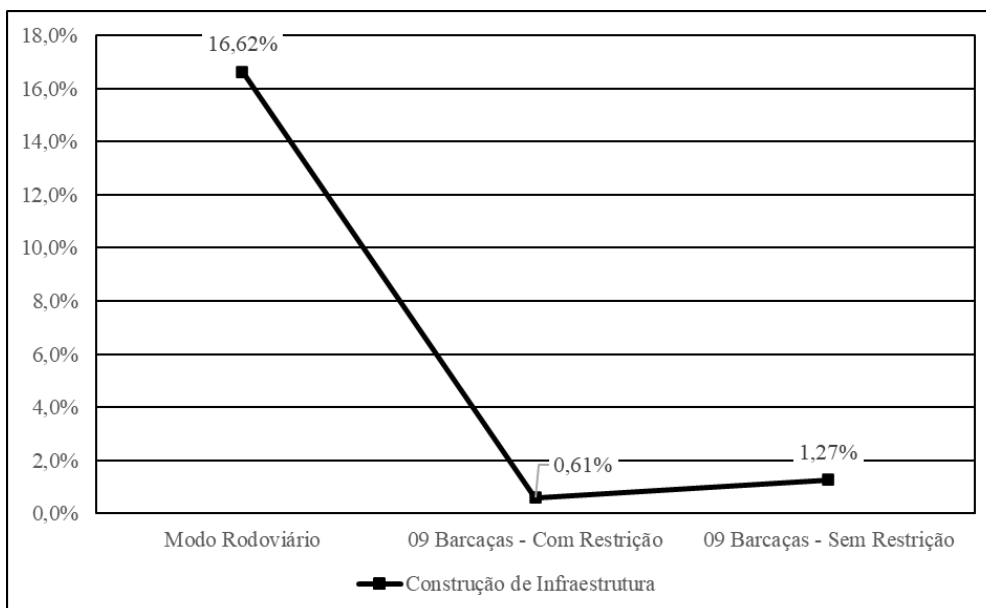


Figura 5-34: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Construção de Infraestrutura do Cenário 1

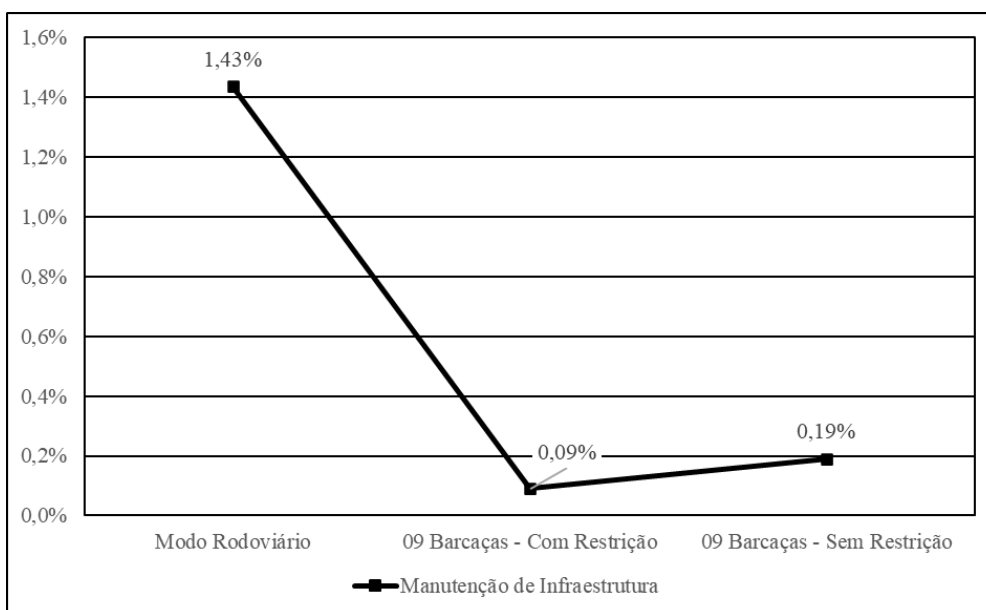


Figura 5-35: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manutenção de Infraestrutura do Cenário 1

A seguir é apresentado o impacto ambiental do Cenário 2.

### 5.3.2 Impacto Ambiental Total do Cenário 2

Conforme descrito no capítulo 3.7.2 (Construção de Cenários Hipotéticos), este cenário consiste no aumento em 72% da vazão d'água, cujo menor nível d'água registrado foi de cinco metros de profundidade, que ocorrem em setembro (5,16 metros). Ou seja, a

pior condição de navegação no período foi favorável ao comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento.

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 178,832 mil  $tCO_{2Eq.}$ , uma redução de 26,97% na comparação com o Cenário-Base. Em relação ao Impacto Ambiental Total nos períodos hidrológicos, a seca representou 35,53% (63,530 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), a cheia 40,49% (72,414 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) e o restante, 23,98% (42,887 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos entre esses períodos (Figura 5-36).

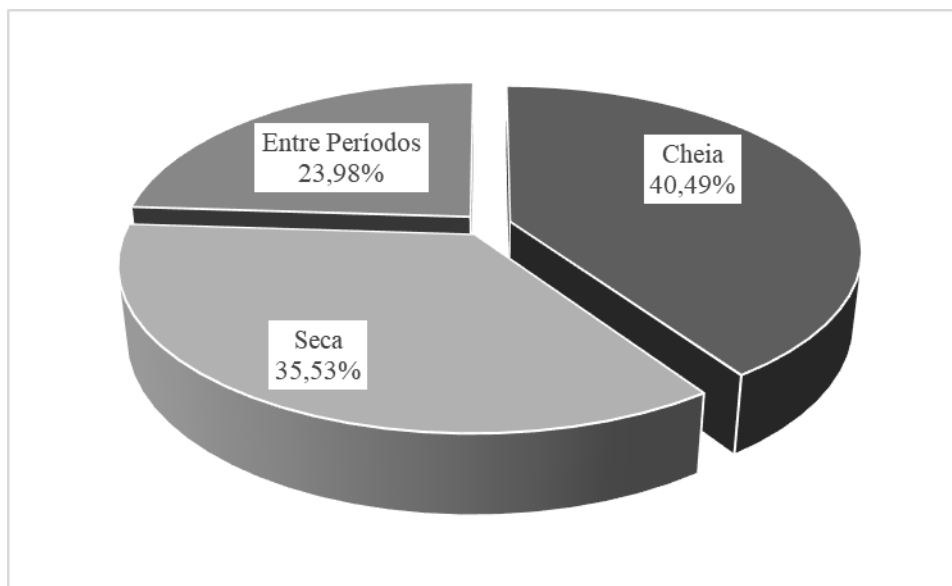


Figura 5-36: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 2

A Figura 5-37 apresenta os valores de Impacto Ambiental Total em relação ao comportamento do Nível D'Água nos meses do período. Neste cenário, outubro foi o período de menor Impacto Ambiental Total (6,899 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), sendo este o período de menor movimentação de grãos (2,05% - 164,838 mil toneladas). Neste período, o valor do Impacto Ambiental Total por tkm foi de 38,75  $gCO_{2Eq.}/tkm$ , o segundo menor valor do período (Figura 5-38).

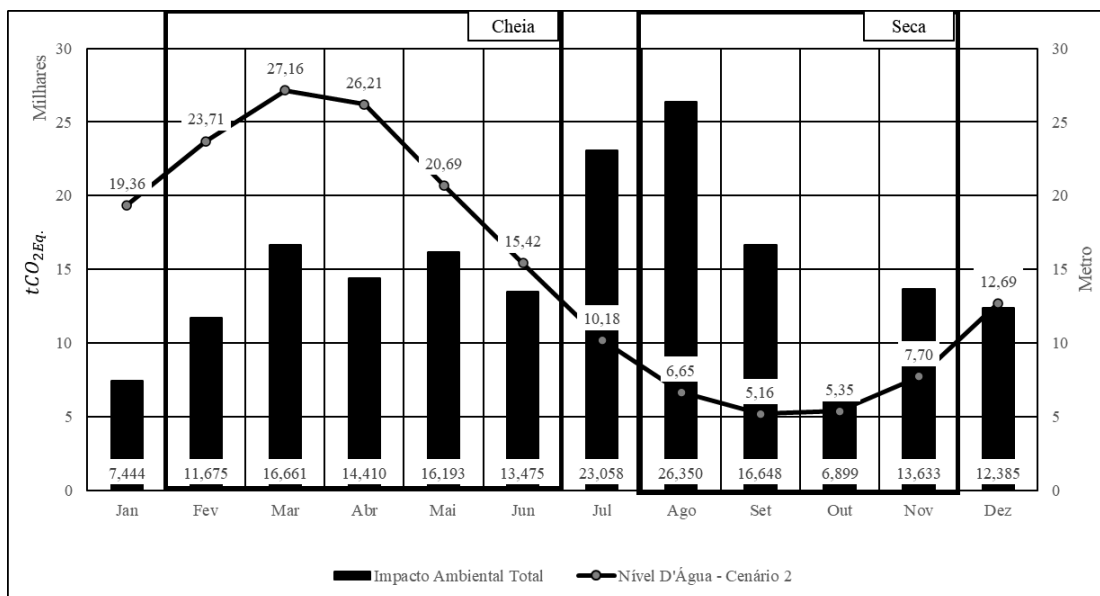


Figura 5-37: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 2

Por outro lado, agosto foi o período de maior Impacto Ambiental Total (14,73% - 23,058 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) e foram transportados 7,81% (629,577 mil toneladas) do total de grãos do período, o que levou ao valor de  $38,75 gCO_{2Eq.}/tkm$ .

O período de maior movimentação de grãos foi março (12,96% - 1,044 milhão toneladas de grãos), cujo Impacto Ambiental Total representou 9,32% (16,660 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) em 12 meses. O quociente da divisão entre o Impacto Ambiental Total e o Momento de Transporte resultou no valor de  $14,77 gCO_{2Eq.}/tkm$ , mesmo valor de janeiro a junho, o que pode ser justificado pelo uso exclusivo do comboio de 20 barcaças.

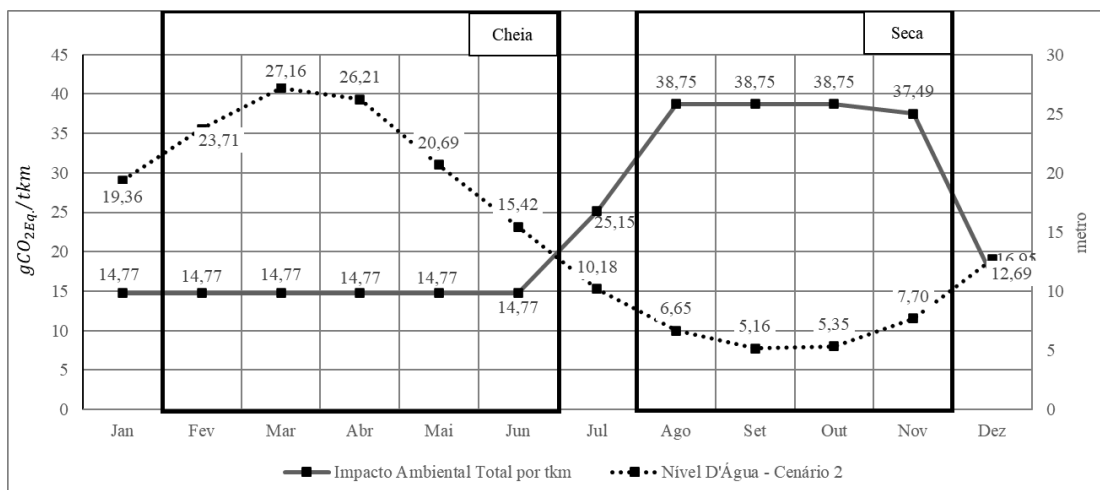


Figura 5-38: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total por tkm e Nível D'Água do Cenário 2

Com vistas a aprimorar as análises, foi considerada o percentual de grãos transportados por comboio de barcaça em relação à curva de Impacto Ambiental Total

por tkm (Figura 5-39). Nesta figura, observa-se que a curva de Impacto Ambiental Total por tkm aumenta conforme a capacidade de carregamento diminui, em razão da redução do nível d'água.

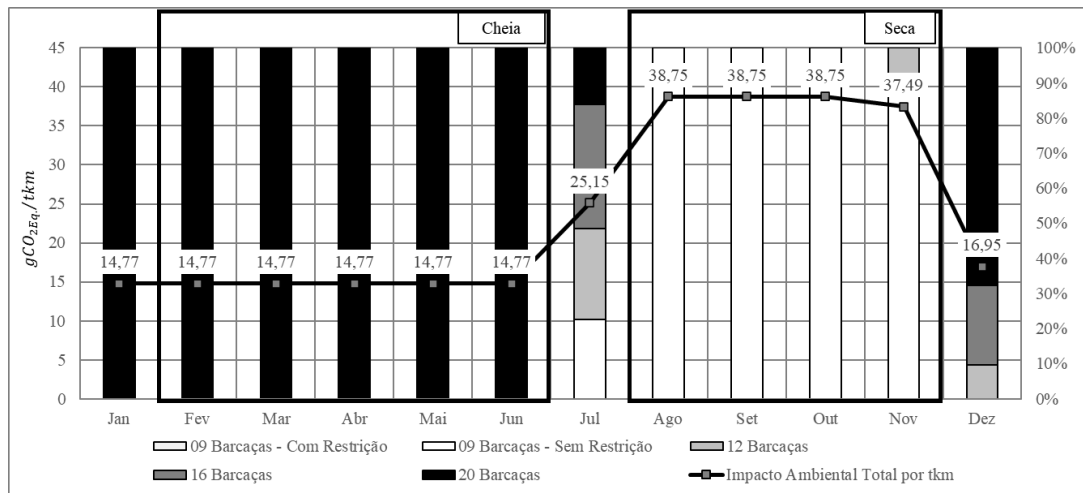


Figura 5-39: Impacto Ambiental Total por tkm em relação ao Percentual de Grãos Transportados dos Comboios de Barcaças do Cenário 2

A seguir é analisado o Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 2.

### 5.3.2.1 Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 2

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 178,83 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 96,19% (172,022 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelo Serviço de Operação de Transporte, enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por apenas 3,81% (6,809 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total (Figura 5-40).

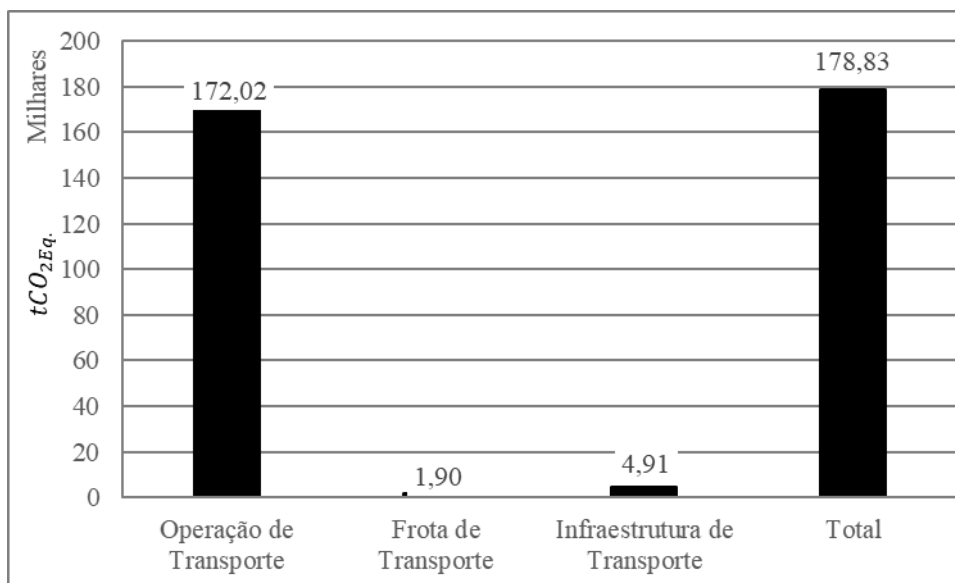


Figura 5-40: Impacto Ambiental Total do Cenário 2

No que se refere o Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte dos comboios de barcaças, o comboio de nove barcaças sem restrição ao carregamento respondeu por 39,22% (70,132 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), dos quais, 97,93% (68,680 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelo Serviço de Operação de Transporte, enquanto os Serviços de Frota e Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por 2,07% (1,452 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), previsto na Figura 5-41.

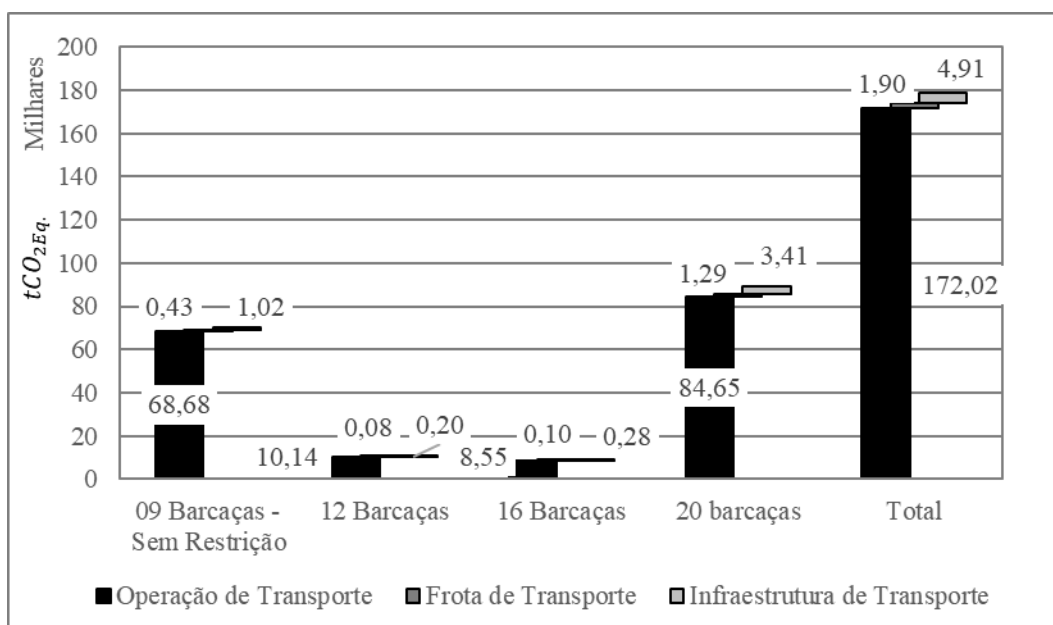


Figura 5-41: Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transporte dos Comboios de Barcaças do Cenário 2

O comboio de 12 barcaças emitiu um total de 10,418 mil  $tCO_{2Eq.}$ , representando 5,83% do Impacto Ambiental Total deste cenário. Do total emitido por este comboio de

barcaças, o Serviço de Operação de Transporte representou 97,33% (10,140 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), e o restante (2,67% - 278,57  $tCO_{2Eq.}$ ) foi emitido nos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

O comboio de 16 barcaças representou 4,99% (8,928 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do Impacto Ambiental Total do Cenário 2. Do total gerado por este comboio de barcaças, 95,81% (8,553 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram geradas pelo Serviço de Operação de Transportes, enquanto o restante, 4,19% (374,10 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transportes.

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes de Serviço de Operação de Transporte do Cenário 2.

**i. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 2**

Do Impacto Ambiental Total do Serviço de Operação de Transporte, 73,15% (357,576 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Viagem de Transporte, e o restante, 16,20% (79,196 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Pré-Combustão (Figura 5-42).

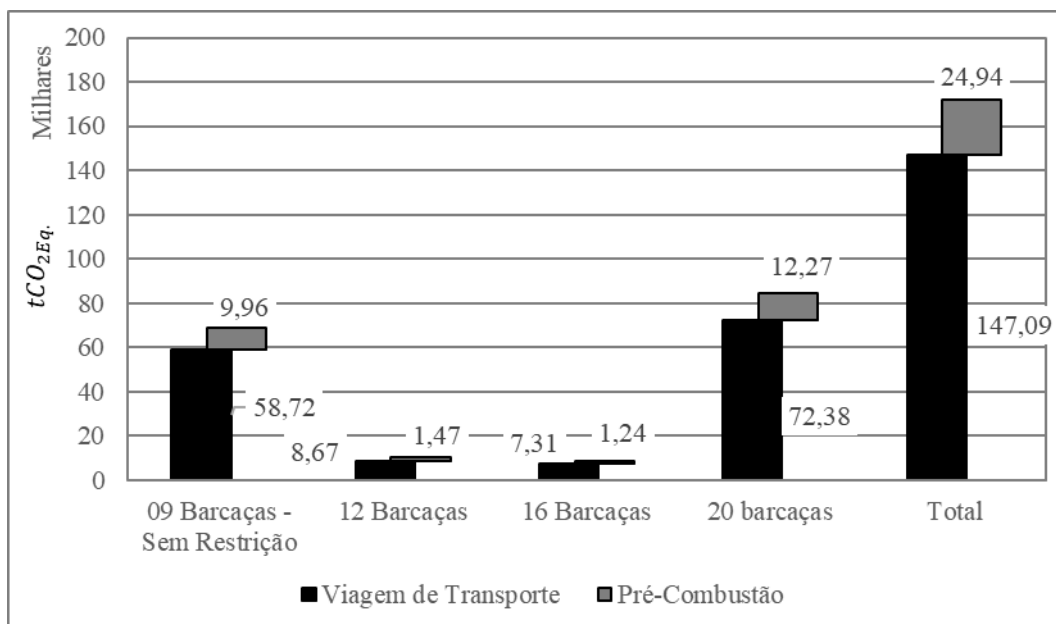


Figura 5-42: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 2

Nos Componentes dos Serviços de Frota de Transportes, observa-se que o modo rodoviário tem o maior percentual de impacto ambiental do Componente Viagem de Transporte em relação ao Impacto Ambiental Total deste modo de transporte, o que pode ser justificado pela mistura de biodiesel no combustível. No caso do modo hidroviário, o aumento da capacidade de carregamento permitiu que esse percentual reduzisse, indicando uma possível relação com a capacidade de carregamento (Figura 5-43e Figura 5-29).

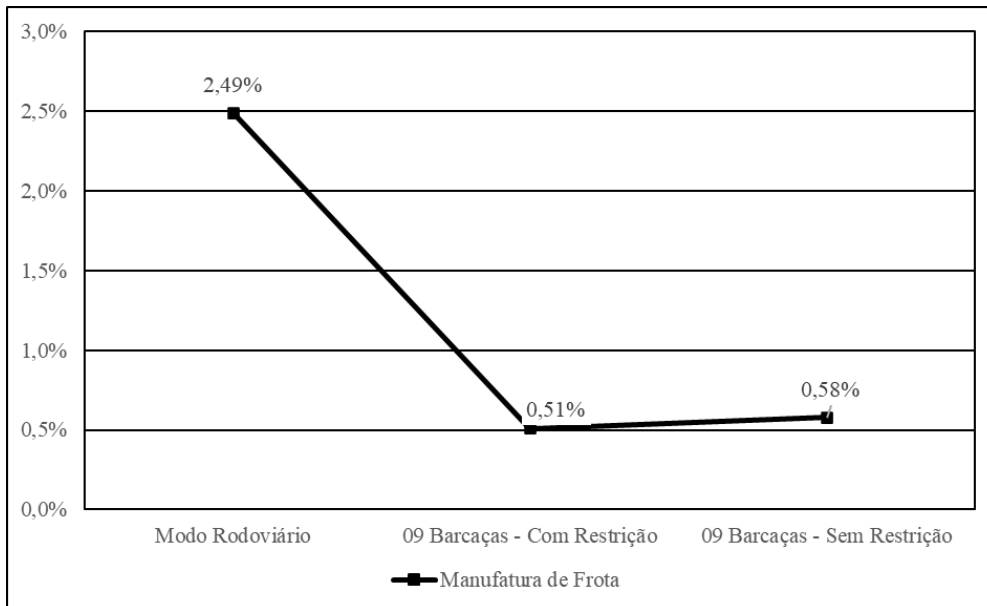


Figura 5-43: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Viagem de Transporte do Cenário 2

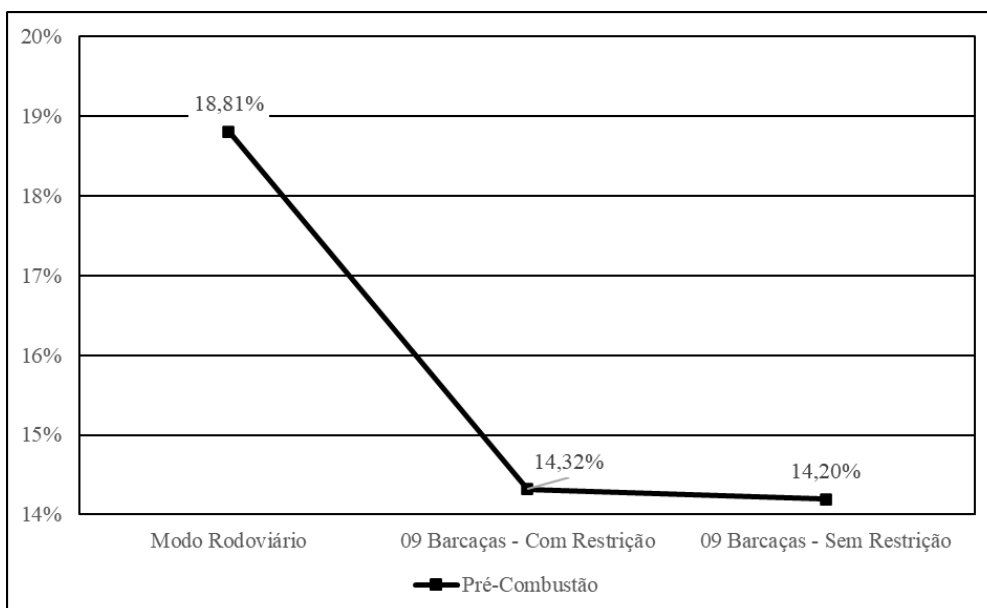


Figura 5-44: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Pré-Combustão do Cenário 2



A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 2.

**ii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 2**

Do Impacto Ambiental Total do comboio de barçaça observado, o Componente Manufatura de Frota representou 0,93% (1,665 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente Manufatura de Frota, e o restante, 0,13% (230,79  $tCO_{2Eq.}$ ), previsto na Figura 5-45.

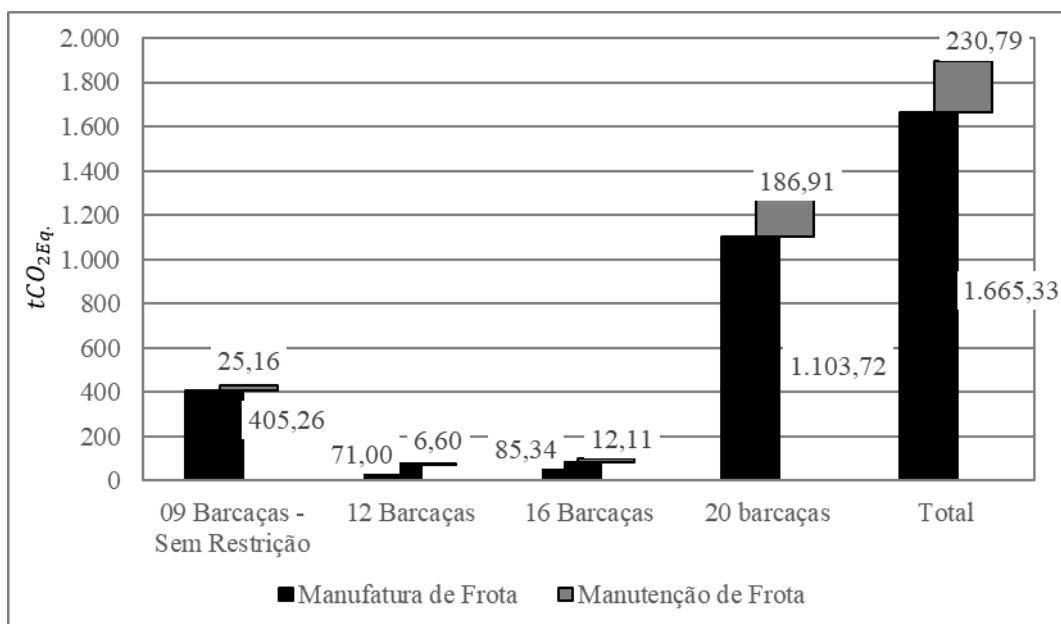


Figura 5-45: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 2

Nos Componentes dos Serviços de Frota de Transportes, observa-se que há uma proporcionalidade do quociente da divisão entre o impacto ambiental dos Componentes dos Serviços de Frota de Transporte e do Impacto Ambiental Total dos respectivos comboios de barçaças, com a capacidade de carregamento. Ou seja, o percentual é maior em comboios de barçaças de maior capacidade de carregamento (Figura 5-46 e Figura 5-47).

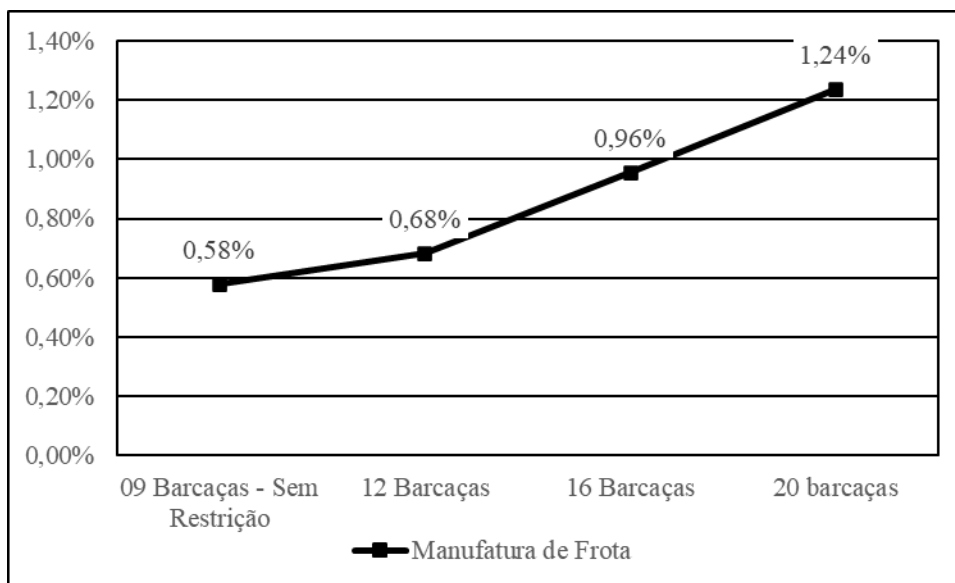


Figura 5-46: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manufatura da Frota do Cenário 2

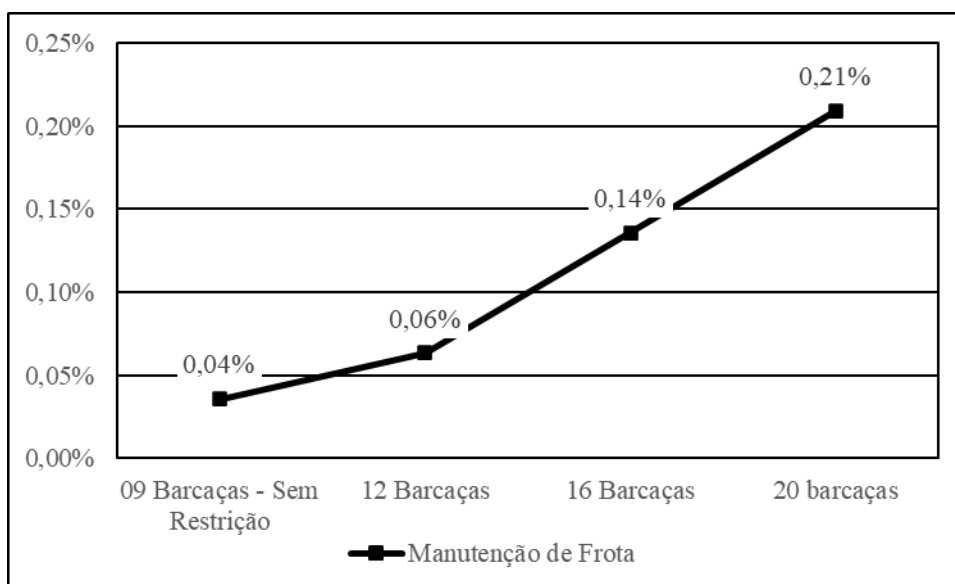


Figura 5-47: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Pré-Combustão do Cenário 2

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 2.

### iii. *Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 2*

Do Impacto Ambiental Total do comboio de barcaça observado, o Componente de Construção de Infraestrutura respondeu por 2,39% (4,276 mil  $tCO_2 Eq.$ ), enquanto o

Componente de Manutenção de Infraestrutura respondeu por 0,36% (637,47  $tCO_2Eq.$ ), previsto na Figura 5-48.

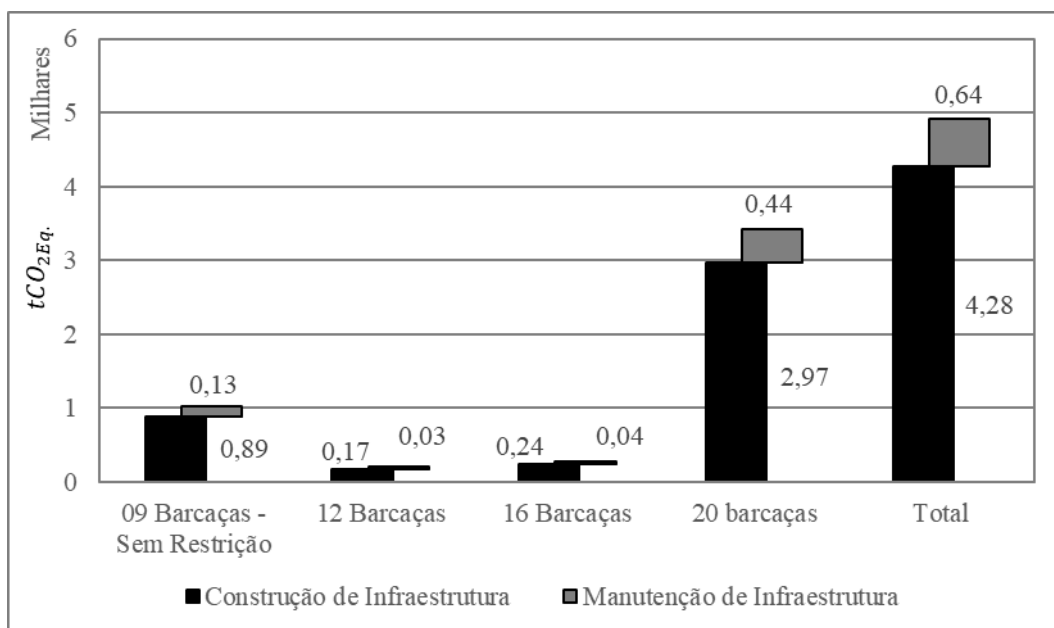


Figura 5-48: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 2

Os Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte têm o mesmo comportamento observado do Componente Frota de Transporte, no qual, o percentual do quociente da divisão entre o impacto ambiental dos Componentes desse Serviço de Transporte e o Impacto Ambiental Total dos comboios de barcaças indica uma proporcionalidade com a capacidade de carregamento (Figura 5-49 e Figura 5-50).

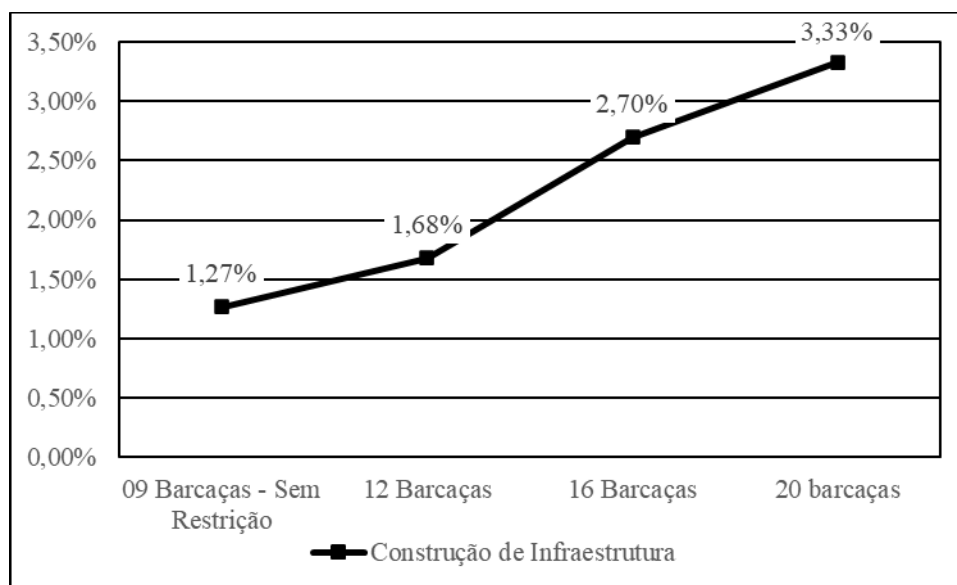


Figura 5-49: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Construção de Infraestrutura do Cenário 2

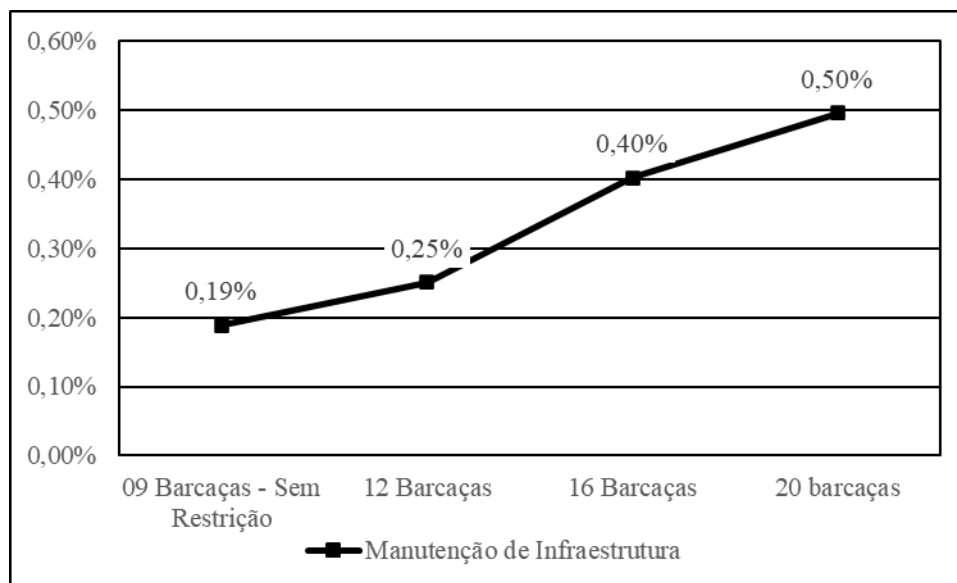


Figura 5-50: Percentual de Impacto Ambiental Total do Componente Manutenção de Infraestrutura do Cenário 2

A seguir é analisado o Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes do Cenário 3.

### 5.3.3 Impacto Ambiental Total do Cenário 3

Conforme descrito no capítulo 3.7.2 (Construção de Cenários Hipotéticos), este cenário consiste pior cenário, no qual os grãos são transportados apenas por meio do comboio de nove barcaças com restrição ao carregamento, independentemente do nível d'água.

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 704,410 mil  $tCO_{2Eq.}$ , um aumento de 187,66% na comparação com o Cenário-Base. Em relação ao Impacto Ambiental Total nos períodos hidrológicos, a seca representou 18,97% (133,633 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), a cheia 56,32% (396,690 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) e o restante, 24,71% (174,085 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos entre esses períodos (Figura 5-51).

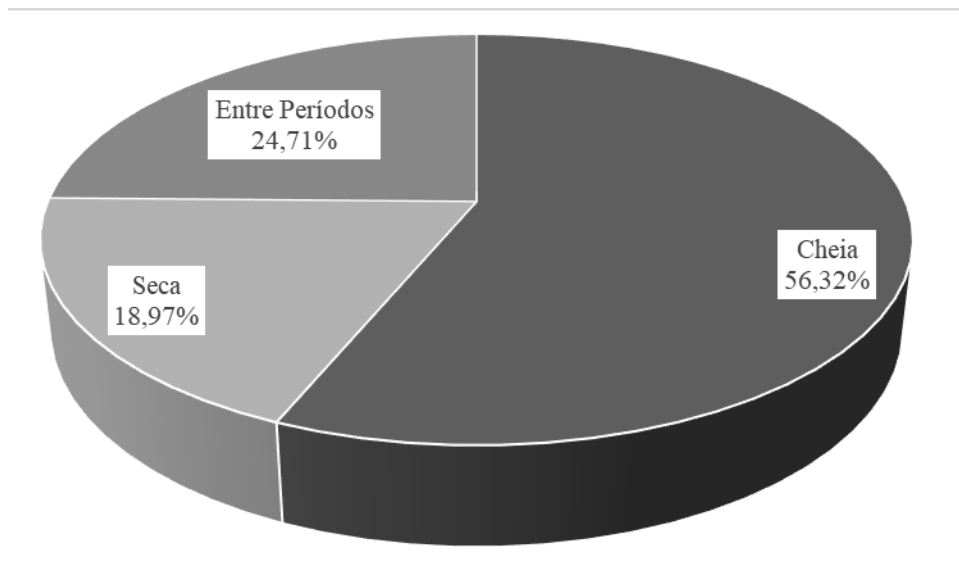


Figura 5-51: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 3

A Figura 5-52 apresenta os valores de Impacto Ambiental Total nos meses do período. Neste cenário, outubro foi o período de menor Impacto Ambiental Total (14,408 mil  $tCO_{2Eq.}$ ), sendo este o período de menor movimentação de grãos (2,05% - 164,838 mil toneladas), o que levou ao valor de Impacto Ambiental Total por tkm de 80,93  $gCO_{2Eq.}/tkm$ . Por outro lado, março foi o período de maior Impacto Ambiental Total (12,96% - 91,269 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) e foram transportados 12,96% (1,044 milhão de toneladas) do total de grãos no ano, o resultando no mesmo valor de Impacto Ambiental Total por tkm obtido em outubro (80,93  $gCO_{2Eq.}/tkm$ ), em razão do uso exclusivo do comboio de nove barcaças.

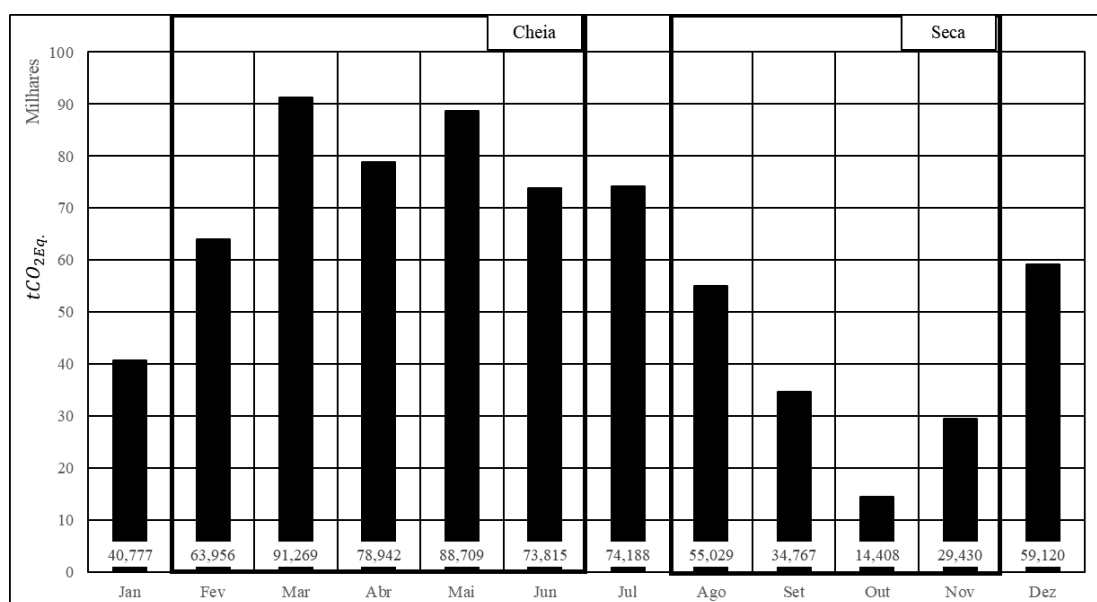


Figura 5-52: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 3

A seguir é analisado o Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 3.

### 5.3.3.1 Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 3

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 704,41 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 98,78% (695,79 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram gerados pelo Serviço de Operação de Transporte, enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por apenas 1,22% (8,619 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) do total (Figura 5-53).

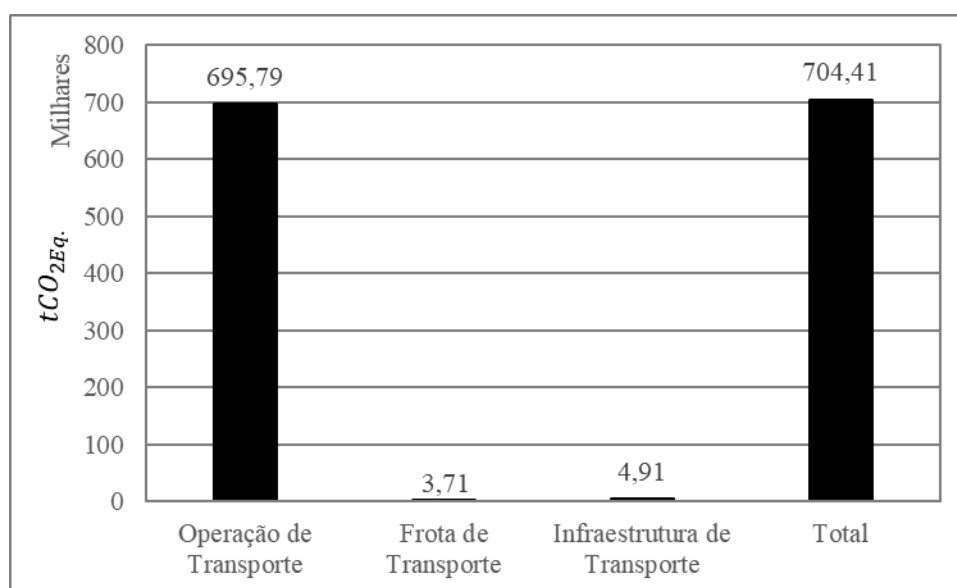


Figura 5-53: Impacto Ambiental Total do Cenário 3

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes de Serviço de Transporte do Cenário 3.

#### ***i. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 3***

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Operação de Transporte emitiu um total de 695,790 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 85,50% (594,932 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Viagem de Transporte, e o restante, 14,50% (100,858 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Pré-Combustão (Figura 5-54).

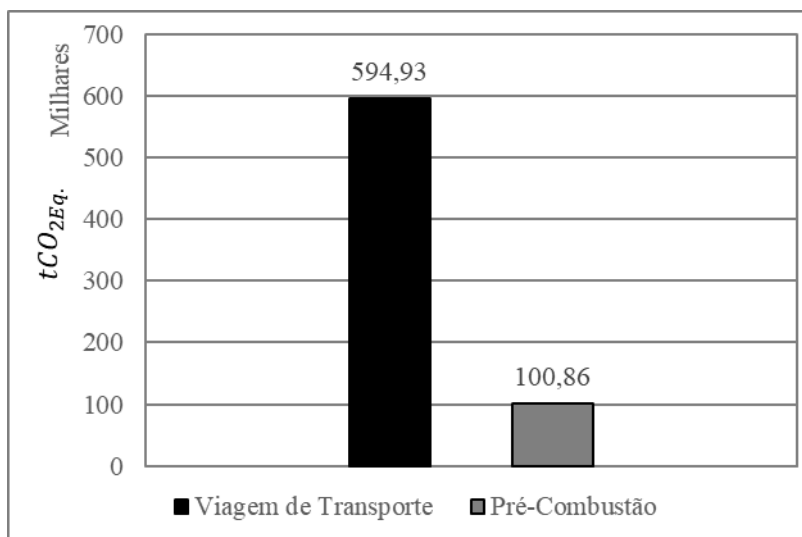


Figura 5-54: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 3

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 3.

**ii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 3**

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Frota de Transporte emitiu um total de 3,705 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 96,73% (3,584 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Manufatura de Frota, e o restante, 3,27% (121,04  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Manutenção de Frota (Figura 5-55).

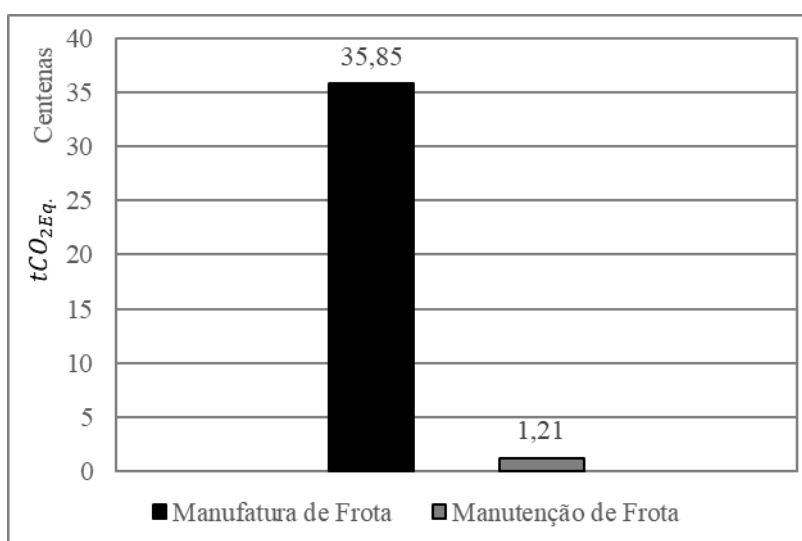


Figura 5-55: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 3

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 3.

**iii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 3**

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Infraestrutura de Transporte emitiu um total de 4,913 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 87,03% (4,276 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Construção de Infraestrutura, e o restante, 12,97% (637,47  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Manutenção de Infraestrutura (Figura 5-56).

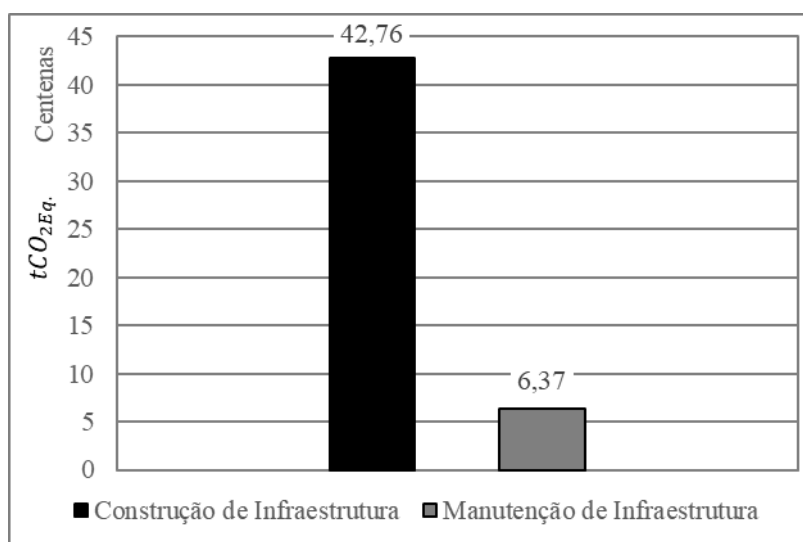


Figura 5-56: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 3

A seguir é analisado o Impacto Ambiental Total dos Serviços de Transportes do Cenário 4.

**5.3.4 Impacto Ambiental Total do Cenário 4**

Análogo ao cenário anterior (Cenário 3), este cenário transporte de grãos por meio do 20 barcaças.

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 128,584 mil  $tCO_{2Eq.}$ , uma redução de 42,02% (-93,203 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) na comparação com o Cenário-Base. Em relação ao Impacto Ambiental Total nos períodos hidrológicos, a seca representou



18,97% (24,393 mil  $tCO_{2Eq}$ ), a cheia 56,32% (72,412 mil  $tCO_{2Eq}$ ) e o restante, 24,71% (31,777 mil  $tCO_{2Eq}$ .) foram emitidos entre esses períodos (Figura 5-57).

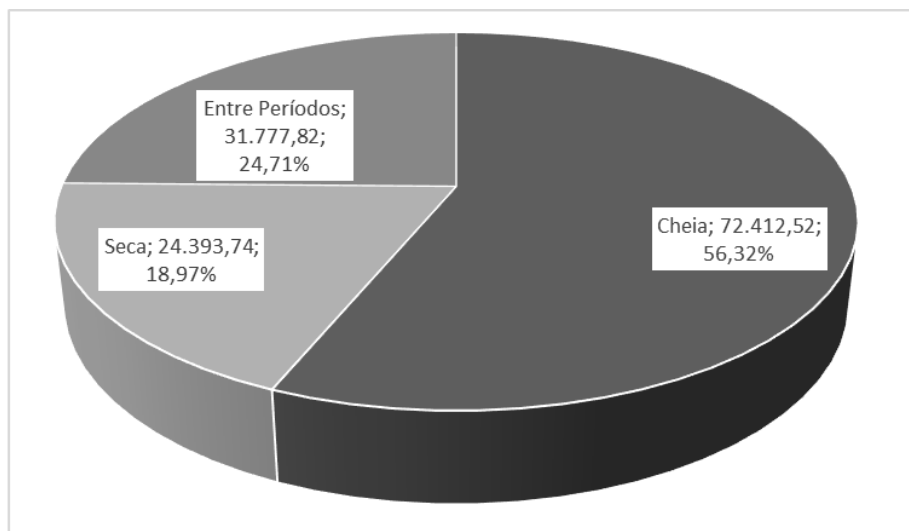


Figura 5-57: Impacto Ambiental Total gerados nos Períodos Hidrológicos do Cenário 4

A Figura 5-58 apresenta os valores de Impacto Ambiental Total nos meses do período. Neste cenário, outubro foi o período de menor Impacto Ambiental Total (2,630 mil  $tCO_{2Eq}$ ), sendo este o período de menor movimentação de grãos (2,05% - 164,838 mil toneladas), o que levou ao valor de Impacto Ambiental Total por tkm de 14,77  $gCO_{2Eq}/tkm$ . Por outro lado, março foi o período de maior Impacto Ambiental Total (12,96% - 16,660 mil  $tCO_{2Eq}$ ) e foram transportados 12,96% (1,044 milhão de toneladas) do total de grãos no ano, o resultando no mesmo valor de Impacto Ambiental Total por tkm obtido em outubro (14,77  $gCO_{2Eq}/tkm$ ), em razão do uso exclusivo do comboio de 20 barcaças.

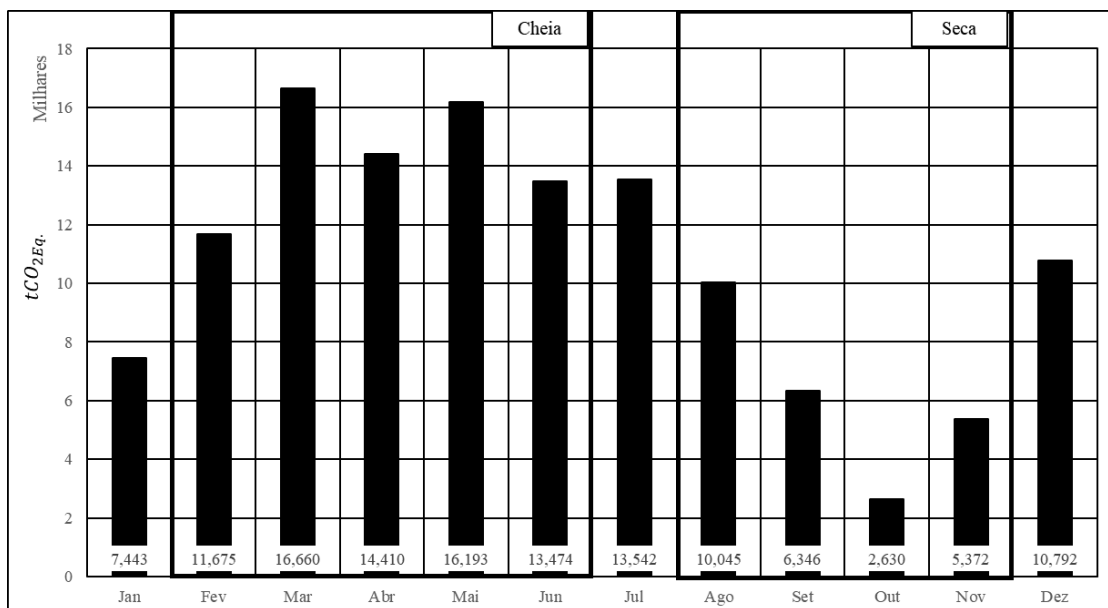


Figura 5-58: Comportamento das Curvas de Impacto Ambiental Total e Nível D'Água no Cenário 3

A seguir é analisado o Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 4.

#### 5.3.4.1 *Impacto Ambiental dos Serviços de Transporte do Cenário 4*

Neste cenário, o Impacto Ambiental Total foi de 128,584 mil tCO<sub>2Eq.</sub>, dos quais 94,73% (121,813 mil tCO<sub>2Eq.</sub>) foram gerados pelo Serviço de Operação de Transporte, enquanto os Serviços de Frota e de Infraestrutura de Transporte responderam, juntos, por apenas 5,27% (6,771 mil tCO<sub>2Eq.</sub>) do total (Figura 5-59).

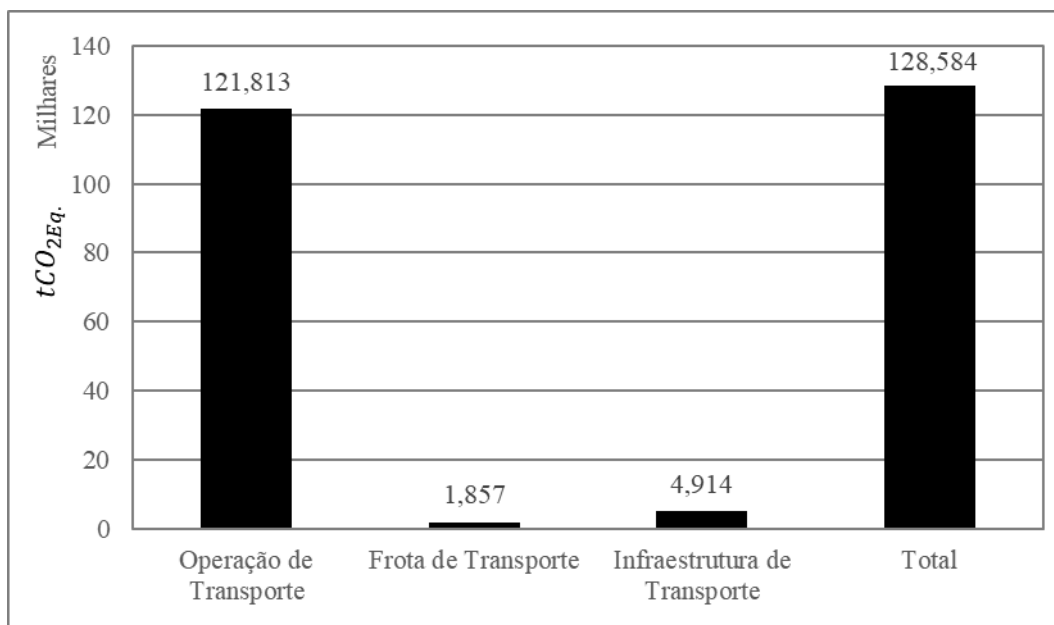


Figura 5-59: Impacto Ambiental Total do Cenário 4

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes de Serviço de Transporte do Cenário 4.

***i. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 4***

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Operação de Transporte emitiu um total de 121,813 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 85,50% (104,155 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Viagem de Transporte, e o restante, 14,50% (17,657 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Pré-Combustão (Figura 5-60).

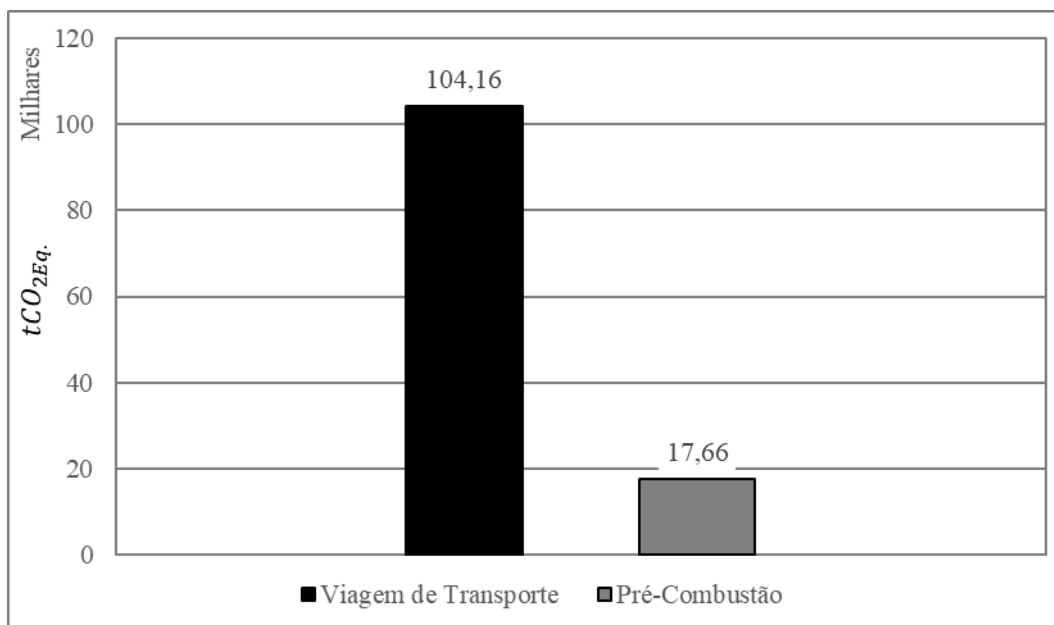


Figura 5-60: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Operação de Transporte do Cenário 4

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 3.

**ii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 4**

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Frota de Transporte emitiu um total de 1,857 mil tCO<sub>2Eq</sub>, dos quais 85,52% (1,588 mil tCO<sub>2Eq</sub>) foram emitidos pelo Componente de Manufatura de Frota, e o restante, 14,48% (268,97 tCO<sub>2Eq</sub>) foram emitidos pelo Componente de Manutenção de Frota (Figura 5-61).

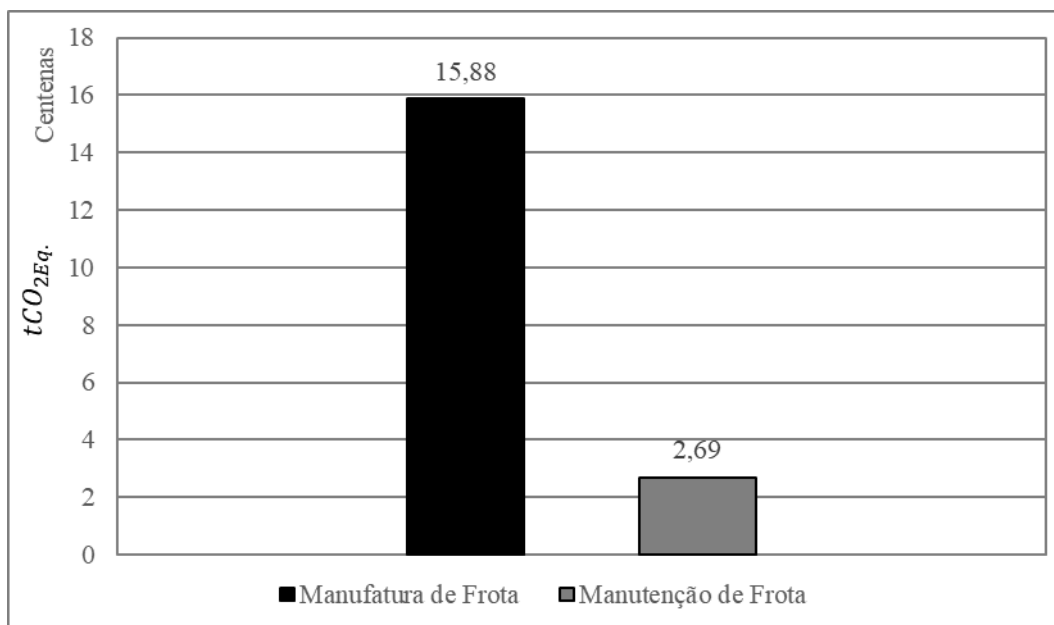


Figura 5-61: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Frota de Transporte do Cenário 4

A seguir é apresentado os resultados do Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 4.

***iii. Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 4***

Conforme apresentado no capítulo anterior, o Serviço de Infraestrutura de Transporte emitiu um total de 4,913 mil  $tCO_{2Eq.}$ , dos quais 87,03% (4,276 mil  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Construção de Infraestrutura, e o restante, 12,97% (637,47  $tCO_{2Eq.}$ ) foram emitidos pelo Componente de Manutenção de Infraestrutura (Figura 5-56).

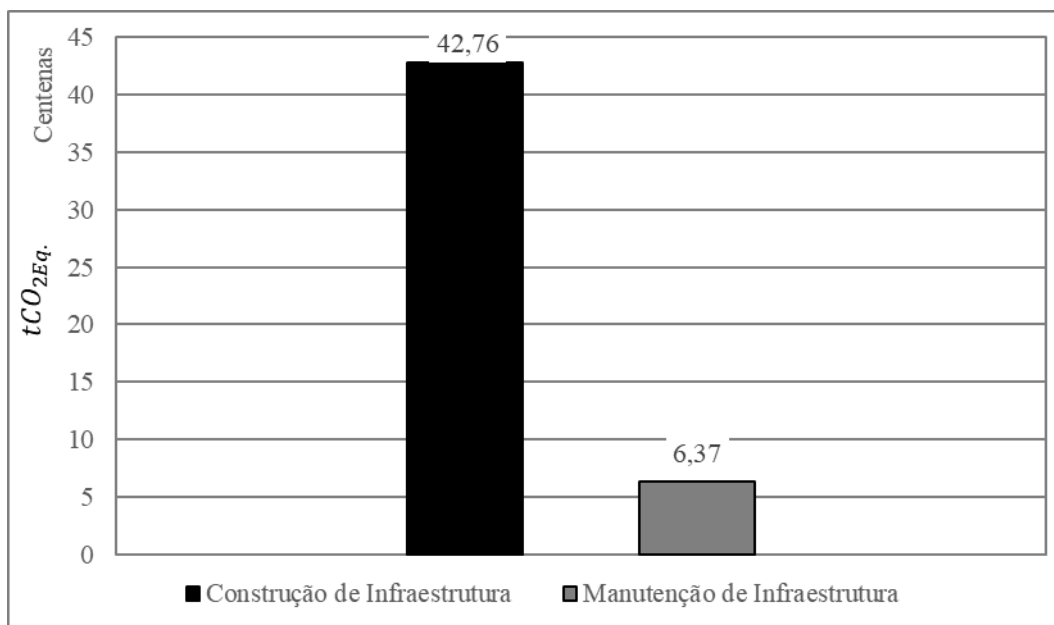


Figura 5-62: Impacto Ambiental Total dos Componentes do Serviço de Infraestrutura de Transporte do Cenário 4

#### 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foi possível consolidar os resultados obtidos nos diferentes cenários, utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint (H). Os resultados demonstraram que o Impacto Ambiental Unitário apresenta maior valor no modo rodoviário. No modo hidroviário, o Impacto Ambiental Unitário foi maior no comboio de nove barcaças – menor capacidade de carregamento –, enquanto os comboios de maior capacidade de carregamento o valor do Impacto Ambiental Unitário diminuiu, indicando uma eficiência de escala.

Os cenários desenvolvidos evidenciaram a importância da condição hidrológica para a otimização do Impacto Ambiental Total, com resultados que reforçam a necessidade de planejamento integrado e políticas voltadas à redução de emissões de  $CO_{2Eq}$ . Nos cenários hipotéticos em que os grãos foram escoados utilizando exclusivamente por meio do modo rodoviário (Cenário 1) ou por meio de comboios de menor capacidade de carregamento (Cenário 3), permitiram uma maior compreensão das do impacto de variáveis exógenas ao sistema de transporte hidroviário e seus efeitos ambientais.

A partir dos dados analisados, constata-se a importância e necessidade de investimentos em infraestrutura e melhorias na eficiência operacional, como a substituição por fonte energética menos nociva ao meio ambiente e a otimização da frota,

que podem desempenhar um papel significativo na mitigação dos impactos ambientais, promovendo maior sustentabilidade no transporte de grãos. Esses resultados oferecem uma base sólida para decisões estratégicas no setor, contribuindo para o cumprimento dos compromissos ambientais e econômicos.

A seguir é tratado da Fase IV (Interpretação) do método ACV, que consiste em análises das Fases II (Análise de Inventário) e III (Análise de Impacto).

## 6 INTERPRETAÇÃO ##

Esta etapa consiste na integração das informações das Fases II (Análise de Inventário) e III (Análise de Impacto) do método ACV, identificando pontos críticos e propondo estratégias de mitigação do impacto ambiental no transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira.

Na Fase I do método ACV (Definição de Objetivo e Escopo), o objetivo desta aplicação é quantificar o impacto ambiental da variação hidrológica no transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira. Para isto, foram elaborados cinco cenários: um Cenário-Base – utilizado como referência – e quatro Cenários Hipotéticos, detalhados no capítulo 3.7 (Cenários).

Nos Cenários 1 e 2, a operação de transporte ocorreu a partir da condição hidrológica. Tendo como referência o Cenário-Base, os Cenários 1 e 2 compreenderam, respectivamente, a redução e o aumento em 72% da vazão d'água mensal. Por outro lado, nos Cenários 3 e 4, a operação de transporte consistiu no uso exclusivo dos comboios de nove e 20 barcaças, respectivamente, independentemente da condição hidrológica.

Em uma análise entre os modos de transportes, os resultados permitiram constatar que o modo rodoviário tem o maior Impacto Ambiental Unitário, atingindo  $83,64 \text{ gCO}_{2\text{Eq.}}/\text{tkm}$ , devido ao elevado consumo de combustível e à limitação da capacidade de carregamento. A média do Impacto Ambiental Unitário dos comboios de barcaças foi de  $35,80 \text{ gCO}_{2\text{Eq.}}/\text{tkm}$ , 57,20% menor que o modo rodoviário. Tal constatação converge com os resultados do trabalho de Spielmann e Scholz (2005), cujas emissões de gases do modo ferroviário e hidroviário foram 65% e 92% menores, respectivamente, quando comparado com o modo rodoviário.

No que se refere ao Impacto Ambiental Unitário dos Serviços de Transporte do modo hidroviário (Figura 6-1), observa-se que a parcela relativa ao Impacto Ambiental Unitário do Serviço de Operação Transporte é inversamente proporcional à capacidade de carregamento dos comboios de barcaças, enquanto a parcela relativa aos Serviços de Frota e Infraestrutura de Transporte aumentam conforme a quantidade de barcaças aumenta. Por outro lado, a parcela relativa dos Serviços de Frota e Infraestrutura foi maior nos comboios de barcaça de maior capacidade de carregamento. Tal constatação converge, em certa medida, com os resultados de van Lier e Macharis (2014), que observaram que na comparação entre duas barcaças de capacidade de carregamento diferente, a parcela relativa do Serviço de Operação de Transporte foi menor na barcaça



de maior capacidade de carregamento, enquanto as parcelas relativa dos Serviços de Frota e Infraestrutura foram maiores nas barcaças de maior capacidade de carregamento.

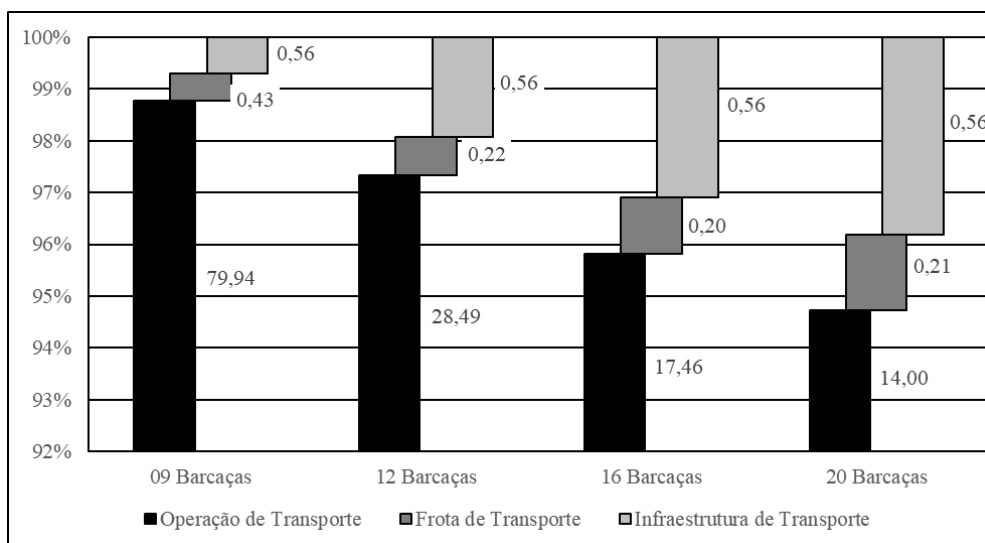


Figura 6-1: Impacto Ambiental Unitário dos Serviços de Transporte do Modo Hidroviário

Em relação ao Impacto Ambiental Total gerado nos cenários (Figura 6-2), verifica-se que o Cenário 3 apresenta o maior impacto ambiental total devido ao transporte exclusivo por meio do comboio de nove barcaças. O Cenário 1, por sua vez, apresenta condição hidrológica desfavoráveis à navegação dos comboios de barcaças, com níveis d'água permanecendo baixos durante todo o período. O serviço de transporte foi interrompido entre julho e início de dezembro, com os grãos transportados por meio do modo rodoviário nesse período. Embora o modo rodoviário seja o principal poluidor entre os modos de transporte, apenas 28,95% do total de grãos utilizou esse modo de transporte, e 71,05% por meio do modo hidroviário (10,46% pelo comboio de nove barcaças e 60,58% pelo comboio de 12 barcaças).

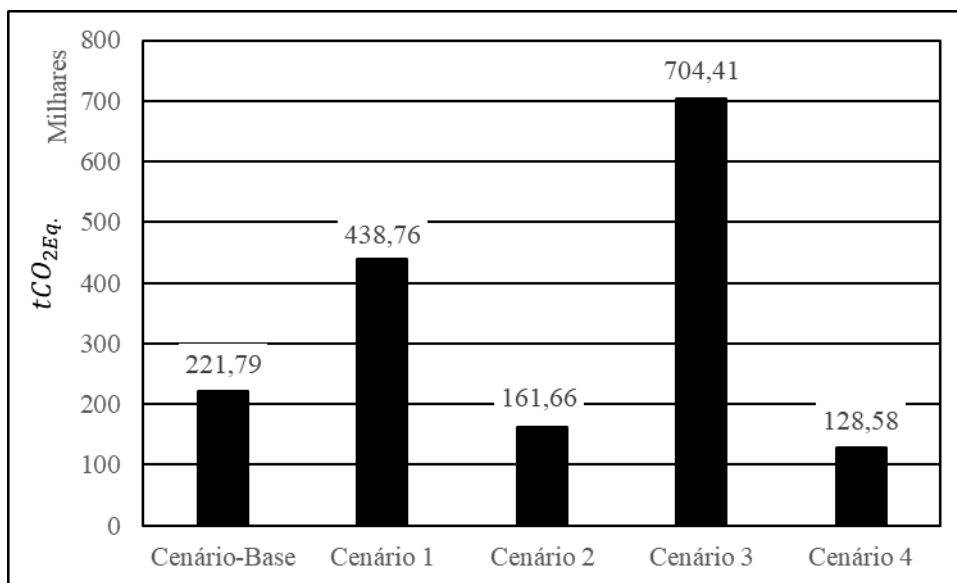


Figura 6-2: Impacto Ambiental Total dos Cenários

Os cenários com menor impacto ambiental usaram comboios de maior capacidade. No Cenário 2, com condições hidrológicas favoráveis, o comboio de 20 barcaças transportou 69,49% dos grãos, enquanto o de nove barcaças não foi usado. No Cenário 4, os grãos foram transportados apenas pelo comboio de 20 barcaças, resultando em um impacto ambiental 20,46% menor comparado ao Cenário 2.

A partir dos resultados dos cenários, as possíveis estratégias que podem mitigar os impactos ambientais relacionados ao transporte de grãos por hidrovias de interior, consistem em (1) investimentos em infraestrutura para sua melhoria e garantir a manutenção de níveis d'água adequados durante todo o ano e dragagem regular para remover bancos de areias e outros obstáculos que podem comprometer a navegabilidade, uma das recomendações do estudo para desenvolver um plano de melhoria para a navegação do rio Madeira (Brasil e USACE, 2019); (2) incentivos ao uso de combustíveis menos nocivos ao meio ambiente, por meio de criação de políticas públicas que incentivem o uso de biocombustíveis ou fontes de energia alternativas, tal como o hidrogênio verde, GNL, entre outros, que converge com a conclusão do trabalho de Fan *et al.*, (2021); (3) otimização logística por meio da melhora no planejamento logístico para maximização do uso de comboios de maior capacidade de carregamento; e (4) eficiência energética por meio de incentivos à substituição de sistema de propulsão mais modernos, cuja tecnologia permite um aumento na eficiência energética, converge com a conclusão do trabalho de Perčić *et al.*, (2021).

## **6.1 Considerações Finais**

Neste capítulo, foi possível constatar que o modo hidroviário é a opção que tem menor impacto ambiental para o transporte de grãos no rio Madeira. A manutenção de condições hidrológicas favoráveis à navegação de comboios de barcaças de maior capacidade de carregamento é essencial para mitigar os impactos ambientais no transporte de grãos.

Esses resultados oferecem subsídios para a elaboração de políticas públicas e estratégias empresariais que permitam a mitigação do impacto ambiental para escoar a produção de grãos aos mercados internacionais, alinhando o desenvolvimento logístico às metas globais de redução de emissões de carbono e conservação ambiental.

## 7 CONCLUSÃO

Esta tese investigou os impactos da variação hidrológica no desempenho ambiental do transporte de grãos por meio da hidrovia do rio Madeira. A partir do desenvolvimento de um método integrado, que incorporou o método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) e variáveis hidrológicas, foi possível quantificar e compreender os efeitos das condições hidrológicas sobre as emissões de  $CO_{2Eq}$  e a eficiência operacional desse modo de transporte. A análise utilizou cenários hipotéticos que consideraram tanto variações na condição hidrológica quanto diferentes configurações logísticas de comboios de barcaças.

Os resultados evidenciaram que a variação hidrológica representa um fator crítico para a performance ambiental e operacional do modo hidroviário. Em períodos de baixos níveis d'água (seca), observou-se um aumento expressivo das emissões de  $CO_{2Eq}$  e da ineficiência operacional devido à necessidade de utilização de comboios de menor capacidade de carregamento. Em comparação com cenários de condições hidrológicas favoráveis à navegação dos comboios de barcaças, as emissões totais de  $CO_{2Eq}$  podem aumentar em até 50%, reforçando o impacto das mudanças climáticas sobre a viabilidade do modo hidroviário na região.

Do ponto de vista metodológico, a tese inovou ao integrar variáveis hidrológicas ao método de ACV, permitindo uma análise detalhada da relação entre os níveis d'água, a configuração dos comboios de barcaças e os impactos ambientais associados. Essa abordagem é especialmente relevante para regiões como a Amazônia, onde o modo hidroviário desempenha um papel estratégico na logística de exportação de grãos e enfrenta grandes desafios impostos por eventos climáticos extremos.

Os achados reforçam a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação que possam minimizar os impactos ambientais do modo hidroviário em cenários de mudanças climáticas. Investimentos em tecnologias sustentáveis, como sistemas de propulsão eficientes e o uso de fontes energéticas menos nocivas ao meio ambiente, associados à manutenção das condições de navegação durante o ano, em especial na seca, emergem como soluções práticas para aumentar a eficiência operacional e reduzir os impactos ambientais do modo hidroviário. Além disso, políticas públicas que incentivem o transporte multimodal e o fortalecimento da infraestrutura hidroviária são essenciais para ampliar a resiliência do sistema logístico.

A análise dos cenários também destacou a importância de promover o monitoramento contínuo e ações preventivas frente às condições hidrológicas extremas. Cenários favoráveis à navegação de comboios de maior capacidade de carregamento mostraram-se mais eficientes e menos nocivas ao meio ambiente, reforçando a relevância de planejar intervenções que garantam a sustentabilidade do modo hidroviário, mesmo em condições adversas.

Cientificamente, esta pesquisa preencheu uma lacuna ao combinar dados hidrológicos regionais com uma abordagem de ciclo de vida aplicada ao transporte por hidrovia de interior. Os resultados gerados oferecem subsídios valiosos para tomadores de decisão e gestores do setor, além de contribuir para o desenvolvimento de estratégias integradas que conciliem crescimento econômico e sustentabilidade ambiental.

Por fim, a pesquisa destaca a necessidade de investigações futuras que explorem de forma mais aprofundada o impacto das mudanças climáticas nos sistemas logísticos e o potencial de soluções tecnológicas, como o uso de fontes energéticas menos nocivas ao meio ambiente e inovações operacionais. Essas investigações são essenciais para consolidar um modelo de transporte resiliente, eficiente e alinhado às demandas futuras, garantindo um equilíbrio entre competitividade logística e preservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. (2009a) *NBR ISO 14040/2009 - Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Brasil. Obtido de [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)
- ABNT. (2009b) *NBR ISO 14044/2009 - Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo de Vida — Requisitos e Orientações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Rio de Janeiro, Brasil. Obtido de [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)
- Bates, M. E., Fox-Lent, C., Seymour, L., Wender, B. A., e Linkov, I. (2015) Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies. *Science of the Total Environment*, 511, 309–318. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.11.003
- Bjørn, A., Owsianiak, M., Laurent, A., Olsen, S. I., Corona, A., e Hauschild, M. Z. (2018) Scope Definition. M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (p. 75–131). Springer International Publishing AG 2018, Quebec. doi:10.1007/978-3-319-56475-3\_8
- Brasil. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. , Ministério do Meio Ambiente (MMA). (1986). Brasília, Brasil.
- Brasil. (2008) *Terminologia Básica. Relatório Anual de Acompanhamento das Concessões Ferroviárias*. Brasília. Obtido de <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/relatorios-e-plano-trienal-de-investimentos-pti-1/2008>
- Brasil. (2014) *Relatório 9 - Volume 3: Memória Justificativa. Serviços de consultoria técnica para a elaboração de estudos de viabilidade técnico-econômico e ambiental - EVTEA e projeto básico e executivo para melhoramentos na hidrovía do Rio Madeira, Mamoré e Guaporé*. Distrito Federal.
- Brasil. (2015) *Entraves logísticos ao escoamento de soja e milho. Confederação Nacional do Transporte - CNT*. Confederação Nacional do Transporte - CNT, Brasília. Obtido de <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/185>
- Brasil. (2017a) *Corredores Logísticos Estratégicos - Volume I - Complexo de Soja e Milho. MTPA - Ministério dos transportes, Portos e Aviação Civil*. MTPA, Brasília. Obtido de <https://www.gov.br/transportes/pt-br/imagens/2020/09/RelatrioCorredoresLogsticosEstratgicosPetrleoCombustveis.pdf>
- Brasil. (2017b) *Manual de Custos de Infraestrutura de transportes - Volume 1: Metodologia e Conceitos. Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)*. Brasília. Obtido de <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>
- Brasil. (2017c) *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes - Volume 3: Equipamentos. Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)*. Brasília. Obtido de <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>

- Brasil. (2017d) *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes - Volume 10: Manuais Técnicos - Conteúdo 10: Hidrovias. Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)*. Brasília. Obtido de [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro\\_antiga/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume-10-manuais-tecnicos/volume-10-manuais-tecnicos](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/manuais-de-custos-de-infraestrutura-de-transportes/volume-10-manuais-tecnicos/volume-10-manuais-tecnicos)
- Brasil. Capítulo 6: Vias Navegáveis da Jurisdição. , Normas e Procedimentos da Capitania Fluvial da Amazônia Ocidental 1–26 (2018). Marinha do Brasil, Brasil. Obtido de <https://www.marinha.mil.br/dpc/npcp-npcf>
- Brasil. (2018b) 2º Termo Aditivo ao Contrato de Adesão (Adaptação) nº 031/2014-ANTAQ. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA), Brasília.
- Brasil. (2019) *Aspectos Gerais da Navegação interior no Brasil*. Confederação Nacional do Transporte - CNT, Brasília. Obtido de <https://cnt.org.br/aspectos-gerais-navegacao-brasil>
- Brasil. (2022a) Termo de Consolidação das Disposições do Contrato de Arrendamento Portuário CDP/APPV nº 96/001/00. Ministério da Infraestrutura - MINFRA, Brasília.
- Brasil. (2022b) *Relatório de parâmetros dos equipamentos do SICRO (julho/2022)*. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Brasília. Obtido de [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro\\_antiga/relatorio-de-parametros-de-equipamentos/parametros-de-custo-horario-dos-equipamentos-ref-jul-2022.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/relatorio-de-parametros-de-equipamentos/parametros-de-custo-horario-dos-equipamentos-ref-jul-2022.pdf)
- Brasil. (2023a) Institucional. *Agência Nacional de Água e Saneamento Básico - ANA*. Obtido 6 de dezembro de 2023, de <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/institucional#:~:text=É responsável por acompanhar a,rios ou quantidade de chuvas.>
- Brasil. (2023b) Marinha do Brasil. *Marinha do Brasil*. Obtido 16 de dezembro de 2023, de <https://www.marinha.mil.br/>
- Brasil. (2023c) Missão da Capitania Fluvial de Porto Velho. *Marinha do Brasil*. Obtido 16 de dezembro de 2023, de <https://www.marinha.mil.br/cfpv/?q=missao>
- Brasil. (2024a) Série Histórica das Safras de Grãos Por Produtos. *Companhia Nacional de Abastecimento (Conab)*. Obtido 29 de março de 2024, de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/908-graos-por-produtos>
- Brasil. (2024b) Resultados do Comércio Exterior Brasileiro - Dados Consolidados. *Secretaria de Comércio Exterior (Secex)*. Obtido 29 de março de 2024, de [https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes\\_dados\\_consolidados/pg.html#produtos](https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados_consolidados/pg.html#produtos)
- Brasil. (2024c) SICRO. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 9 de fevereiro de 2024, de <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>
- Brasil. (2024d) Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). *Instituto Brasileiro do Meio*

- Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA*. Obtido 27 de dezembro de 2024, de <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>
- Brasil. (2025a) Painel do Estatístico Aquaviário. *Transporte Vias Interiores*. Distrito Federal, Brasil. Obtido 28 de março de 2024, de <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/transpviasint.html#>
- Brasil. (2025b) Série Histórica das Safras. *Conab - Companhia Nacional de Abastecimento (Translation: National Supply Company)*. Distrito Federal, Brasil. Obtido 20 de janeiro de 2025, de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras#grãos-2>
- Brasil. (2025c) Hidroweb - Séries Históricas de Estações - Translation - Historical Series of Seasons. *Agência Nacional de Água e Saneamento Básico - ANA*. Obtido 20 de janeiro de 2025, de <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>
- Brasil, e INECO. (2014) *Relatório 1: Resultados da Fase I - Coleta de informações - Translation: Report 1: Results of Phase I - Collection of information. Estudo dos custos do transporte hidroviário no Brasil - Elaboração de ferramenta de simulação - Translation: Study of waterway transport costs in Brazil - Development of a simulation tool*. Distrito Federal. Obtido de <https://www.epl.gov.br/estudo-dos-custos-do-transporte-hidroviario-no-brasil-elaboracao-de-ferramenta-de-simulacao>
- Brasil, e INECO. (2015) *Relatório 3: Resultados da Fase III - Estudo de Caso - Translation: Report 3: Results of Phase III - Case Study. Estudo dos custos do transporte hidroviário no Brasil - Elaboração de ferramenta de simulação - Translation: Study of waterway transport costs in Brazil - Development of a simulation tool* (Vol. 3). EPL - Empresa de Planejamento e Logística S.A., Distrito Federal, Brasil. Obtido de <https://www.epl.gov.br/estudo-dos-custos-do-transporte-hidroviario-no-brasil-elaboracao-de-ferramenta-de-simulacao>
- Brasil, e USACE. (2019) *Madeira River Navigation Improvement Planning Study FINAL REPORT. DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte*. Brasília.
- Cepea, e Abiove. (2024) *Cadeia da soja e do biodiesel: PIB, empregos e comércio exterior - 4º trimestre de 2023*. São Paulo. Obtido de <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-da-cadeia-de-soja-e-biodiesel-1.aspx>
- Christodoulou, A., Christidis, P., e Bisselink, B. (2020) Forecasting the impacts of climate change on inland waterways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82(November 2019). doi:10.1016/j.trd.2019.10.012
- CODOMAR e AHIMOR. (2018) *Viabilidade Econômica-Financeira do Empreendimento: Projeto EVTEA - Hidrovia do Tapajós/Teles Pires/Juruena. Companhia Docas do Maranhão (CODOMAR) e Administração das Hidrovia da Amazônia Oriental (AHIMOR)*.
- Conab. (2022) *Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2022. Companhia Nacional de Abastecimento - Conab*. Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, Brasília. Obtido de <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes?limitstart=0>
- Crawford, R. H. (2011) *Life Cycle Assessment in the Build Environmental*. (R. H. Crawford, Ed). Spon



Press, London and New York.

- Dombrow Junior, C. A. (2017) *A Importância das Hidrovias Brasileiras na Redução do Custo Brasil: A Hidrovia do Rio Madeira e sua contribuição para o Arco Norte*. Escola de Guerra Naval. Obtido de [https://www.marinha.mil.br/egn/sites/www.marinha.mil.br/egn/files/CPEM020 TESE CMG DOMBROW.pdf](https://www.marinha.mil.br/egn/sites/www.marinha.mil.br/egn/files/CPEM020_TESE_CMG_DOMBROW.pdf)
- Duan, H., Hu, M., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, W., Huang, Q., e Li, J. (2015) Quantification of carbon emissions of the transport service sector in China by using streamlined life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 95, 109–116. doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.029
- Ebert, S. (2005) *Literature Review: Inland Navigation and Emissions*. Vienna.
- Ecoinvent. (2023a) Geographies. *Ecoinvent Databases*. Obtido 3 de fevereiro de 2023, de <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/geographies/>
- Ecoinvent. (2023b) Geographies. *Ecoinvent Databases*.
- European Union. (2025) Eurostat. *Statistics Explained - Glossary:Tonne-kilometre (tkm)*. Obtido 19 de janeiro de 2025, de [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre\\_\(tkm\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre_(tkm))
- Fan, A., Wang, J., He, Y., Perčić, M., Vladimir, N., e Yang, L. (2021) Decarbonising inland ship power system: Alternative solution and assessment method. *Energy*, 226(X). doi:10.1016/j.energy.2021.120266
- Fox-Lent, C., Bates, M. E., e Kurth, M. H. (2019) *Basics of life-cycle assessment for navigation. Technical Note (Dredging Operations and Environmental Research (U.S.))*. Environmental Laboratory (U.S.); Engineer Research and Development Center (U.S.), Vicksburg (Mississippi, U.S.). doi:http://dx.doi.org/10.21079/11681/34856
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., e van Zelm, R. (2009) *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint levels*. (1ª, Ed) *Report i: Characterization*. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer., Netherlands.
- Goedkoop, Mark, Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., e Meijer, E. (2016) *Introduction to LCA with SimaPro. PRé-Sustainability*. SimaPro, San Francisco/USA. Obtido de <https://support.simapro.com/articles/Manual/Introduction-to-LCA>
- Gomes, W. de B., Correia, F. W. S., Capistrano, V., Veiga, J. A. P., Vergasta, L. A., Chou, S. C., Lyra, A. de A., e Rocha, V. M. (2020) Avaliação dos Impactos das Mudanças na Cobertura da Terra e Cenário de Emissões (RCP 8.5) no Balanço de Água na Bacia do Rio Madeira. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(4), 689–702. doi:10.1590/0102-77863540076
- Hauschild, M. Z. (2018) Chapter 6: Introduction to LCA Methodology. M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (p. 59–66). Springer, Cham, Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-56475-3

- Hauschild, M. Z., Bonou, A., e Olsen, S. I. (2018) Life Cycle Interpretation. M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (p. 1–1215). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-56475-3
- Hofbauer, F., e Putz, L.-M. (2020) External costs in inland waterway transport: An analysis of external cost categories and calculation methods. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14). doi:10.3390/su12145874
- Huang, H., Zhou, C., Xiao, C., Huang, L., Wen, Y., Wang, J., e Peng, X. (2020) Effect of seasonal flow field on inland ship emission assessment: A case study of ferry. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). doi:10.3390/SU12187484
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., e van Zelm, R. (2017) ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. doi:10.1007/s11367-016-1246-y
- IPCC. (2021) *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds) *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- ISO. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. , International Standardization for Organization 30 (2006).
- JRC. (2010) *ILCD Handbook: Framework and requirements for LCIA models and indicators First edition*. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (1<sup>o</sup> ed). European Union, Ispra (VA). doi:10.2788/38719
- Kievits, S. (2019) *A framework for the impact assessment of low discharges on the performance of inland waterway transport*. Delft University of Technology.
- Kloppfer, W. (1997) Life Cycle Assessment: From the Beginning to the Current State. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4), 223–228. doi:https://doi.org/10.1007/BF02986351
- Merchan, A. L., Léonard, A., Limbourg, S., e Mostert, M. (2019) Life cycle externalities versus external costs: The case of inland freight transport in Belgium. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67(January), 576–595. doi:10.1016/j.trd.2019.01.017
- Nascimento, F. A. C. do. (2021) *Alguns Aspectos Operacionais e Ambientais Incorporados a um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários: Uma Contribuição Metodológica à Luz da Análise do Ciclo de Vida*. UFRJ. Obtido de <https://www.pet.coppe.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses/2021/1502-alguns-aspectos-operacionais-e-ambientais-incorporados-a-um-sistema-de-gerenciamento-de-pavimentos-aeroportuarios-uma-contribuicao-metodologica-a-luz-da-analise-do-ciclo-de-vida>
- Novo, A. L. A. (2016) *Perspectivas para o Consumo de Combustível no Transporte de Carga no Brasil: uma Comparação entre os Efeitos Estrutura e Intensidade no Uso Final de Energia do Setor*.

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- ONU. United Nations Framework on Climate Change Kyoto Protocol. , Organização das Nações Unidas 1–24 (1997). Kyoto. Obtido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- Perčić, M., Vladimir, N., e Fan, A. (2021) Techno-economic assessment of alternative marine fuels for inland shipping in Croatia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148(January), 111363. doi:10.1016/j.rser.2021.111363
- Porto de Rotterdam. (2024) The port that will take you ahead. Obtido 5 de dezembro de 2024, de <https://www.portofrotterdam.com/en/why-rotterdam/port-will-take-you-ahead#:~:text=With a surface area of,even to maximum size vessels>.
- PRÉ. (2025) Help Center. *What is the difference betweenecoinvent market and transformation processes?* Obtido 4 de março de 2025, de <https://support.simapro.com/s/article/What-is-the-difference-between-ecoinvent-market-and-transformation-processes>
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A.-M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., e Vieira, M. (2018) Chapter 10: Life Cycle Impact Assessment. M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen (Eds), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* (p. 167–270). Springer, Cham, Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-56475-3
- SETAC. (1993) *Guidelines for Life-Cycle Impact Assessment: “Code of Practice”*. (Frank Consoli, D. Allen, A. Boustead, J. Fava, W. Franklin, A. A. Jensen, N. de Oude, R. Parrish, R. Perriman, D. Postlethwaite, B. Quay, J. Seguin, & B. Vigon, Eds)*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Vol. 1). Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Sesimbra. Obtido de [https://cdn.ymaws.com/www.setac.org/resource/resmgr/books/lca\\_archive/guidelines\\_for\\_life\\_cycle.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.setac.org/resource/resmgr/books/lca_archive/guidelines_for_life_cycle.pdf)
- Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., e Tuchschild, M. (2007) *Transport Services. Ecoinvent report N° 14*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Spielmann, M., e Scholz, R. W. (2005) Life cycle inventories of transport services: Background data for freight transport. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), 85–94. doi:10.1065/lca2004.10.181.10
- Teixeira, C. A. N., Rocio, M. A. R., Mendes, A. P. do A., e D’Oliveira, L. A. S. (2018) *Navegação Interior Brasileira. BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Social*. Rio de Janeiro. Obtido de <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15380>
- UN. Adoption Paris Agreement - COP21. , United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC (2015). Paris. Obtido de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- van Lier, T., e Macharis, C. (2014) Assessing the environmental impact of inland waterway transport using a life-cycle assessment approach: The case of Flanders. *Research in Transportation Business and Management*, 12, 29–40. doi:10.1016/j.rtbm.2014.08.003

WBG. (2023) Climate Change Knowledge Portal. *World Bank Group*. Obtido 19 de novembro de 2023, de <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/brazil/climate-data-historical>