

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

FRANCISCO BAYARDO MAYORQUIM HORTA BARBOSA

**PROPOSIÇÃO DE *FRAMEWORK* PARA AVALIAÇÃO
DE ROTAS DE EXPORTAÇÃO:
Energia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem**

**SÃO PAULO
2025**

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSIÇÃO DE *FRAMEWORK* PARA AVALIAÇÃO
DE ROTAS DE EXPORTAÇÃO:
Energia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção

Linha de pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Economia Circular

Projeto de Pesquisa: Planejamento e Gestão em busca de cadeias de produção mais sustentáveis: processo, produto, consumo e descarte.

FRANCISCO BAYARDO MAYORQUIM HORTA BARBOSA

SÃO PAULO

2025

Barbosa, Francisco Bayardo Mayorquim Horta.

Proposição de *framework* para avaliação de rotas de exportação: energia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem / Francisco Bayardo Mayorquim Horta Barbosa. – 2025. 157 f. : il. color. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cecília Maria Villas Bôas de Almeida.

1. *Framework* para tomada de decisão. 2. Rotas logísticas de exportação. 3. Energia. 4. Emissões de CO₂. I. Almeida, Cecília Maria Villas Bôas de (orientadora). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

**PROPOSIÇÃO DE *FRAMEWORK* PARA AVALIAÇÃO
DE ROTAS DE EXPORTAÇÃO:
Energia, emissões de CO₂, custo e tempo de viagem**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia de Produção da Universidade
Paulista - UNIP, para obtenção do título de Doutor
em Engenharia de Produção.

Data de aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

_____/_____/_____
Profa. Orientadora Dra. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida
Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/_____
Prof. Dr. Biagio Fernando Giannetti
Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/_____
Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho
Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/_____
Prof. Dr. Daniel Jugend
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP

_____/_____/_____
Profa. Dra. Vanina Macowski Durski Silva
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Ao meu pai, Francisco, cujo amor e ensinamentos moldaram quem sou. Guardo com carinho nossas conversas e, claro, o exemplo inesquecível da pedra e do algodão. Sinto falta do seu abraço, pai, e da sua presença.

Aos meus filhos, Júlia e Eduardo. Meu amor por vocês é do “tamanho do infinito”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, Senhor que dá a vida e quer o nosso bem. Noutros termos, seu nome é *inspiração*.

À Profa. Cecília Maria Villas Bôas de Almeida, minha orientadora, meus agradecimentos. Sua dedicação, seu conhecimento, sua sabedoria e sua paciência foram essenciais. Sou a ela grato por ter abraçado comigo o desafio deste tema, com valiosas sugestões e, por vezes, decisivas mudanças de “rotas” até a conclusão desta tese.

Agradeço a Francisco e a Sílvia, meus amados pais (*in memoriam*). A eles sou grato pela vida que me deram, pelos momentos que guardo no coração e pela alegria de ter sido filho deles.

Agradeço aos meus filhos, Júlia e Eduardo, que tornam cada um dos meus dias mais ricos com a alegria de ser pai. Agradeço ainda a Cláudia, mãe dos meus filhos. Embora nossos caminhos pessoais tenham se separado, o laço de pais que nos une é eterno, assim como nosso amor por Júlia e Eduardo.

Agradeço aos Professores do Programa de Pós-Graduação, Dr. Biagio Fernando Giannetti, Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho e Dr. Fábio Sevegnani, pelas aulas, pelas sugestões, pelas conversas e pelos bons momentos no LaProMA.

Agradeço aos Professores membros da banca examinadora, Dra. Cecília Maria V. B. de Almeida, Dr. Biagio F. Giannetti, Dr. Feni D. R. Agostinho, Dr. André Andrade Longaray (Qualificação), Dr. Daniel Jugend e Dra. Vanina Macowski Durski Silva, pelas valiosas sugestões ao trabalho.

À Tia Erly, minha mãe do coração, agradeço pelas orações incansáveis e pelo carinho com que sempre me envolveu como a um filho. Agradeço a Iná Lúcia e a Cornélia por todo amor, por toda a amizade e por todo o zeloso apoio durante esta caminhada.

Agradeço aos meus compadres, Alexandre e Alessandra, por terem me "adotado" e acompanhado em cada passo deste doutorado, por celebrar as conquistas e oferecer apoio nas dificuldades. Ao casal de amigos Adriano Giaciani e Keila, pelos inúmeros momentos de “abrigo” e conversas em SP, meu obrigado.

Agradeço a todos os profissionais da UNIP, em especial a Luiz Ghelmandi Netto e Márcia Nunes (ex-secretária do PPGE), e aos colegas (mestrandos e

doutorandos) do LaProMa, com quem tive o privilégio de compartilhar muitos momentos e aprendizados desde 2022.

Agradeço aos meus amigos e parceiros de estudos, Arno Clasen e Euclides Serafim. Quantas "resenhas", cafés e discussões produtivas compartilhamos! A presença destes amigos foi essencial nesta caminhada.

Agradeço ao Prof. Robert de Souza (Diretor da Faeng/UFMS) e aos professores (Faeng): Andréa Romero, Camila Comineti, Carolina Lino, Cristiano Quevedo, David Alex, Diego Fogaça, Edson Batista, João Batista Sarmiento, Kássia Tonheiro, Luciana Cambraia, Nadya Kalache, Saulo Moreira, Tiago Mateus e Valéria Quevedo. Obrigado pelo apoio em cada momento.

Agradeço a todos os que contribuíram com informações técnicas, pesquisas e sugestões: Ângela Maria Gonçalves Ramos (Transp. Cordenonsi), Ariel Zatorre, Arno Pedro Clasen, Cayo Bittencourt, Cláudio Fernandes de Almeida, David Alex Suarez (Faeng), Dorival Silva de Oliveira (SETLOG), Felipe Ribeiro Moura, Jacson Mateus Alba Jr., João Batista S. dos Santos Neto (Faeng), José Laerte Barboza, Júlio Cesar Vieira Rosa, Lucas Oshiro (DNIT), Lúcio Lagemann (SEMADESC), Luís Antônio Rodrigues Silva, Luiz Antônio Gregório (Transp. Cordenonsi), Mayara Farias Borges, Michel Cangani, Raphael Cação (Três Américas Transportes), Renato Bortolotto, Renato Prado Siqueira, Rodrigo Cunha de Figueiredo, Rodrigo Lima Cavalcante (Agesul), Rubens Silvestrini (*in memoriam*) e Vinícius Amorim.

Agradeço aos meus professores da UFMS (desde a graduação): Élcia Esnarriaga de Arruda, Dario de Oliveira Lima Filho e Leandro Sauer. Seus ensinamentos e o impacto em minha formação permanecem vivos em minhas lembranças, e, por isso, ser-lhes-ei sempre grato.

A todos os meus familiares, amigos, colegas e ex-alunos que acompanharam e torceram por mim deixo o meu muito obrigado.

Agradeço à Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (Faeng/UFMS) pelo apoio à qualificação e pela concessão do afastamento.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos (PROSUP).

RESUMO

Essa tese apresenta um novo *framework* para avaliar rotas logísticas de exportação, que integram dimensões ambientais, econômicas e operacionais. Este *framework* combina indicadores tradicionais, como custos e tempo de viagem, com métricas ambientais que incluem emissões de CO₂ e energia - medida que quantifica a energia total investida no sistema – o que oferece uma avaliação abrangente das redes de transporte. Motivado pela necessidade de enfrentar os desafios de sustentabilidade no transporte, especialmente considerando a dependência histórica aos combustíveis fósseis e sua contribuição significativa para as emissões de CO₂, este estudo alinha-se aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável, incluindo os estabelecidos pela Agenda 2030 da ONU. A pesquisa ressalta que, embora fatores econômicos continuem a influenciar as decisões, a importância crescente dos indicadores ambientais e sociais é essencial para garantir a sustentabilidade a longo prazo. Para ilustrar a aplicabilidade do *framework* proposto, a avaliação foca em três rotas de exportação utilizadas predominantemente para o transporte de carne bovina do Mato Grosso do Sul, Brasil, até mercados da China. Ela examina as rotas com base em critérios, como energia, custos de construção e operação, emissões de CO₂ e tempo de viagem. Esta análise revela os *trade-offs* entre desempenho ambiental e eficiência operacional; gera *insights* valiosos para formuladores de políticas e gerentes de logística. Utilizando um modelo de tomada de decisão multicritério, o *framework* integra os resultados de diversos indicadores; destaca que, apesar de uma rota poder se destacar em métricas ambientais, ela pode ser menos eficiente do ponto de vista econômico ou operacional, o que evidencia a necessidade de decisões equilibradas. Simulações de diferentes cenários logísticos indicam que a redistribuição equilibrada da carga entre as três rotas pode aprimorar ainda mais a sustentabilidade geral. Isto defende estratégias de exportação diversificadas, em vez de concentrar todas as exportações em uma única rota. Portanto, o *framework* proposto representa uma contribuição significativa para a avaliação da logística de exportação, pois promove decisões informadas e equilibradas que enfrentam os desafios contemporâneos de sustentabilidade.

Palavras-chave: *Framework* para tomada de decisão; Rotas logísticas de exportação; Energia; Emissões de CO₂.

ABSTRACT

This dissertation presents a novel framework for evaluating export logistics routes by integrating environmental, economic, and operational dimensions. This framework incorporates traditional indicators such as costs and travel time alongside environmental metrics, including CO₂ emissions and emergy—the total energy input for generating outputs—offering a comprehensive assessment of transportation networks. Motivated by the pressing need to address sustainability challenges in transportation, particularly given the traditional reliance on fossil fuels and their contribution to CO₂ emissions, this research aligns with global sustainable development goals, notably those outlined in the United Nations Agenda 2030. The study underscores that while economic factors remain pivotal in decision-making, the increasing importance of environmental and social indicators is essential for achieving long-term sustainability. To illustrate the framework's applicability, the evaluation focuses on three export routes primarily used for transporting beef from Mato Grosso do Sul, Brazil, to markets in China, assessing them on criteria such as emergy, construction and operational costs, CO₂ emissions, and travel time. This analysis reveals the trade-offs between environmental performance and operational efficiency, thereby generating insights valuable for policymakers and logistics managers. Employing a multi-criteria decision-making model to integrate outputs from various indicators, the framework highlights that while some routes may excel in environmental performance, they may be less economically or operationally efficient, necessitating balanced decision-making strategies. Scenario simulations further indicate that distributing cargo across multiple routes can enhance overall sustainability, advocating for diversified export strategies over prioritizing a single route. The framework thus represents a significant contribution to export logistics evaluation, promoting informed, balanced decision-making that addresses contemporary sustainability challenges.

Keywords: Framework for decision making; Export logistics routes; Emergy; CO₂ emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Framework</i> proposto para a otimização de rotas logísticas de exportação.	41
Figura 2. Rotas de exportação consideradas neste estudo.	43
Figura 3. Rotas rodoviárias.	45
Figura 4. Esquema de sessão transversal do pavimento.	49
Figura 5. Representação das distâncias para o trecho marítimo das rotas logísticas de exportação.....	55
Figura 6. Indicadores de desempenho utilizados para avaliar rotas de exportação. .	58
Figura 7. Diagrama de energia de rotas logísticas de exportação.	66
Figura 8. Situação atual e cenários simulados.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Artigos usados na revisão de literatura.	18
Tabela 2. Inventário resumo das três rotas logísticas de exportação consideradas como estudo de caso para a validação do <i>framework</i> proposta.....	57
Tabela 3. Objetivos dos indicadores de desempenho utilizados para avaliar rotas de exportação.....	59
Tabela 4. Cálculo da emergia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 1.....	68
Tabela 5. Cálculo da emergia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 2.....	70
Tabela 6. Cálculo da emergia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 3.....	72
Tabela 7. Resultado geral para o indicador emergia.....	73
Tabela 8. Resultado do indicador emissões de CO ₂ -eq.: emissões indiretas e diretas por rota logística de exportação.	76
Tabela 9. Custos econômicos em 'km-ano' por rota logística de exportação.....	78
Tabela 10. Tempo de viagem aos portos da China (modais rodoviários e marítimos).	79
Tabela 11. Matriz de decisão apresentando os resultados dos indicadores.	80
Tabela 12. Aplicação da abordagem multicritério.....	81
Tabela 13. Resultados para os indicadores do <i>framework</i> proposto por unidade funcional.....	82
Tabela 14. Aplicação da abordagem multicritério.....	84
Tabela 15. Resultados obtidos com a simulação da quantidade de carne transportada entre as rotas logísticas de exportação para cada cenário.	87
Tabela 16. Multicritério aplicado aos cenários considerando o mesmo peso para cada indicador.....	89
Tabela 17. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador emergia.	89
Tabela 18. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador emissão de CO ₂ eq..	90
Tabela 19. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador custo financeiro.....	90

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Utilidade da tese	16
1.2 Objetivo geral.....	17
1.2.1 Objetivos específicos	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Métodos de avaliação no setor de transportes	18
2.2 Métodos de avaliação com ênfase na síntese em energia	32
3. PROPOSIÇÃO DE <i>FRAMEWORK</i> DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS LOGÍSTICOS	40
3.1. Aplicação do <i>framework</i> proposto.....	42
3.1.1. Definição dos objetivos do estudo: avaliar três rotas de exportação de carne bovina partindo do Mato Grosso do Sul, Brasil, até Xangai, China	42
3.1.2. Modelagem dos sistemas logísticos para elaboração do inventário	44
3.1.2.1 Cálculo da infraestrutura das rodovias	48
3.1.2.2 Cálculo dos equipamentos, materiais e mão de obra para a fase de construção das rodovias.....	52
3.1.2.3 Cálculo dos equipamentos, combustível e mão de obra para a fase de operação das rodovias	53
3.1.2.4 Operação do sistema marítimo.....	53
3.1.3. Coleta de dados: Inventário	56
3.1.4. Seleção e cálculo dos critérios de avaliação: indicadores.....	58
3.1.4.1 Energia investida	59
3.1.4.2 Emissões de CO ₂ -eq.	60
3.1.4.3 Custos econômicos operacionais	61
3.1.4.4 Tempo de viagem	62
3.1.5 Aplicação do modelo de tomada de decisão.....	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Aplicação do <i>framework</i> em rotas logísticas de exportação	65
4.1.1 Diagrama de energia.....	65
4.1.2 Análise dos indicadores	66
4.1.2.1 Indicador eMergia	66
4.1.2.2 Indicador emissões de CO ₂ -eq.	75
4.1.2.3 Indicador custos financeiros	77
4.1.2.4 Indicador tempo de viagem	78
4.1.3 Aplicação do modelo de tomada de decisão.....	79
4.2 Aplicação em estudo de caso para a carne bovina do Mato Grosso do Sul	81
4.2.1 Análise dos indicadores	82

4.2.2 Decidindo sobre qual rota logística de exportação deveria ser priorizada	84
4.3 Possíveis cenários para a exportação de carne bovina.....	85
4.3.1 Aplicação do modelo de tomada de decisão.....	88
4.4 Discussão dos Resultados.....	91
5. CONCLUSÕES	94
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS.....	97
APÊNDICES.....	103
Apêndice A. <i>Unit emergy values</i> (UEVs) coletadas de literatura para aplicar a síntese em emergia.	103
Apêndice B. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP - 1057,52 km.....	105
Apêndice C. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR - 1096,44 km.	110
Apêndice D. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile - 2465,04 km.	114
Apêndice E. Inventário de dados para a infraestrutura das rodovias: rotas 1, 2 e 3.	120
Apêndice F. Cálculos das horas de trabalho de pessoas e máquinas.....	126
Apêndice G. Inventário de dados da etapa de construção das rotas rodoviárias estudadas.	128
Apêndice H. Inventário de dados da etapa de operação das rotas rodoviárias estudadas.	137
Apêndice I. Detalhes de cálculo das emissões de CO ₂ -eq./ton.carne na China....	143
Apêndice J. Símbolos utilizados na elaboração do diagrama de energia.	147
Apêndice K. Memorial de cálculo da etapa de operação pelo sistema marítimo.	148
Apêndice L. Custos e tempo de viagem da etapa de operação pelo sistema marítimo.....	154
Apêndice M. Dados resultantes da simulação em cada cenário desenvolvido....	156

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, políticas globais destacam a importância do desenvolvimento sustentável para o equilíbrio socioeconômico e ambiental em escala planetária, e isso inclui setores como a indústria, a agricultura, a geração de energia e o comércio, além dos sistemas logísticos de transporte. Tradicionalmente, a sustentabilidade incorpora avaliações integradas sobre os aspectos ambientais, econômicos e sociais. No setor de transportes, é crucial considerar tais avaliações, já que, para a operação dos veículos, emitem-se muitos gases de efeito estufa, assim como há um elevado custo social e econômico com desapropriação e intervenções (Chen *et al.*, 2021; Mohapatra *et al.*, 2023).

A Organização das Nações Unidas (United Nations, 2024), por meio dos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODSs) para 2030, reconhece a importância do setor de transportes no desenvolvimento econômico, social e ambiental. Diretamente, destacam-se o ODS3 (meta 3.6, reduzir pela metade as mortes e os ferimentos globais por acidentes em estradas), ODS9 (meta 9.1, desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça), ODS11 (meta 11.2, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos) e o ODS13 (tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos).

É notório que o transporte de pessoas e mercadorias consome quantidade significativa de derivados de petróleo (Adam; Boateng; Acheampong, 2020), de maneira que este setor se tornou uma fonte significativa de poluição, a exemplo da emissão de CO₂ (Chen *et al.*, 2021). O Fórum Internacional de Transporte (ITF, 2021) estima que o transporte de cargas emite mais de 40% de todo o CO₂ do setor de transporte. Diante desse cenário, medidas de mitigação, como a transição para combustíveis mais limpos, investimentos em modais alternativos e otimização das operações logísticas, tornam-se essenciais. Para avaliar o desempenho ambiental de sistemas logísticos de transporte, ferramentas, como a avaliação do ciclo de vida (Azadgoleh *et al.*, 2024; Chaudhary e Akhtar, 2024), a pegada ecológica (Cheng *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2024) e as análises multicritério (Lerede *et al.*, 2021; Octaviansyah *et al.*, 2024) são amplamente utilizadas na literatura.

No contexto global, o setor de transportes é um dos maiores contribuintes para mudanças climáticas e desafios ambientais, além de representar custos sociais significativos (Khurshid *et al.*, 2023). Avaliações tradicionais muitas vezes falham em integrar de forma holística aspectos ambientais, sociais e econômicos, especialmente em sistemas logísticos interligados ao comércio internacional (Muschett, 2000).

A necessidade de um *framework* para avaliar rotas de exportação surge da complexidade em alinhar demandas de transporte, emissões de gases de efeito estufa e impactos sociais e econômicos com os ODSs. Um *framework* específico não só pode permitir mensurar e comparar rotas sob múltiplas dimensões da sustentabilidade, mas também apoia a formulação de estratégias mitigadoras, como uso de modais mais limpos e eficientes, além da otimização logística. Isso é particularmente relevante para atender metas dos ODSs. Sem um instrumento robusto de avaliação, escolhas de rotas podem intensificar impactos adversos no uso do solo, na poluição e na perda de biodiversidade, o que compromete o desenvolvimento sustentável.

Para exemplificar a aplicação do *framework*, foi realizada uma avaliação detalhada de três rotas brasileiras, abrangendo suas particularidades e analisando os respectivos impactos nos aspectos ambientais, sociais e econômicos. O transporte desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico e social. Ele permite a circulação de pessoas e mercadorias em países de grande extensão territorial, como o Brasil. O transporte no país tem sido fortemente dependente da rede rodoviária (Wang *et al.*, 2024), que alcança 65% da matriz de transporte nacional (Confederação Nacional do Transporte - CNT, 2022a). Este predomínio se deve, em grande parte, à dependência do agronegócio, setor que utiliza as rodovias como principal via de escoamento da produção. Assim, condições adequadas da malha rodoviária são determinantes para a eficiência logística e o desenvolvimento econômico de uma região. Seja por meio de transporte intermodal ou multimodal, a existência de uma infraestrutura rodoviária eficiente contribui para a competitividade do setor produtivo (Confederação Nacional do Transporte - CNT, 2022b).

Embora o modal rodoviário seja amplamente utilizado, sua construção e operação apresentam desafios ambientais significativos. A construção de rodovias exige extensas intervenções no uso do solo, enquanto a operação demanda grandes quantidades de combustíveis fósseis para abastecer veículos. Hasan, Whyte e Aljassmi (2024) destacaram a necessidade de sistemas rodoviários mais sustentáveis,

dado o uso intensivo de materiais virgens para construção e manutenção de estradas. Igualmente, Mohapatra *et al.* (2023) reforçaram que intervenções no uso do solo resultam emissões de poluentes, degradação do solo e perda de biodiversidade.

Como elo fundamental na cadeia logística, os portos brasileiros complementam as rodovias e viabilizam o escoamento das exportações. Entre os principais portos, destacam-se o de Santos, na região Sudeste, e o de Paranaguá, na região Sul, ambos localizados às margens do Oceano Atlântico. Nesse contexto, a possibilidade de uma nova rota pelo Oceano Pacífico surge como alternativa estratégica que, segundo Almeida *et al.* (2013), reduziria distâncias em relação ao mercado asiático e ampliaria as opções logísticas para produtos do Centro-Sul do país.

Nesta tese, três rotas de exportação, com partida de Campo Grande/MS com destino à China, são avaliadas de acordo com o *framework* proposto, incluindo-se nelas os transportes rodoviário e marítimo. Em relação ao transporte rodoviário, dois corredores logísticos estão em operação no Brasil e têm como destino os portos de Santos/SP e Paranaguá/PR; o terceiro está em fase de implementação, com destino ao porto de Iquique/Chile.

Sabe-se pouco sobre os impactos ambientais decorrentes das obras de infraestrutura e do aumento significativo do tráfego de veículos durante e após a implementação da nova rota (Fraser e Chester, 2016), o que requer avaliar os impactos ao meio ambiente, considerando-se a avaliação uma ferramenta sistêmica.

Este estudo, além de avaliar os custos financeiros, as emissões de CO₂ e o tempo de viagem, emprega a síntese em emergia proposta por Odum (1996), uma abordagem sistêmica que considera o lado do doador de recursos. A síntese em emergia possibilita subsidiar tomadas de decisões em relação a aspectos econômicos, ambientais e sociais, e tem sido utilizada para mensurar o desempenho em emergia de diferentes escalas. No setor de transporte rodoviário, destaca-se o trabalho de Cristiano e Gonella (2019), o qual investigou e usou a síntese em emergia para avaliar uma expansão de rodovia na Itália.

Assim, este estudo propõe um *framework*, para avaliação de sistemas logísticos de transporte, que considera emergia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem. Como objeto de estudo são consideradas três rotas de exportação de carne bovina a partir do Brasil até a China. Posteriormente, os resultados são analisados em uma matriz de tomada de decisão tradicional para subsidiar políticas focadas em sustentabilidade e em qual rota de exportação que deveria ser priorizada.

O uso dos indicadores selecionados objetiva subsidiar, de forma científica e prática, decisões voltadas à redução do impacto ambiental e ao uso de recursos naturais não renováveis para a construção de obras de infraestrutura e para a operação do transporte de cargas. Os mesmos exemplificadores estão especialmente exemplificados no modal rodoviário brasileiro, como preconizado pelos ODSs das Nações Unidas (United Nations, 2024). Dessa forma, espera-se que este estudo possa chamar a atenção para a importância de se considerar o uso de ferramentas de avaliação sistêmica na concepção de políticas públicas.

1.1 Utilidade da tese

Esta tese contribui com a proposição de um *framework* para avaliação de sistemas logísticos de transporte, baseada em emergia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem, aplicada a um estudo de caso real. Três rotas de exportação de carne bovina a partir de Campo Grande/MS com destino à China foram avaliadas: duas delas já existentes e uma terceira em implementação. A rota de exportação em fase de implementação liga o oeste brasileiro ao Chile (malha rodoviária), e sua construção é motivada pela falta de uma alternativa de escoamento da produção nacional para o Oceano Pacífico, com a perspectiva de redução no tempo de viagem até o principal país importador da carne bovina brasileira - a China. Contudo, há uma lacuna no conhecimento sobre os custos financeiros e ambientais da rota em implementação.

De forma teórica, o trabalho contribui para a utilização da síntese em emergia como indicador do *framework* de avaliação proposto. O uso da emergia como indicador adicional possibilita uma avaliação sistêmica que considera o lado do doador, diferente de outras ferramentas tradicionais, amplamente utilizadas para a avaliação de sistemas de transporte. De forma prática, o trabalho contribui com a proposição do *framework* de avaliação que pode ser aplicada em qualquer sistema logístico de transporte, além de possibilitar aos tomadores de decisão que escolham qual rota de transporte deveria ser priorizada para a exportação de produtos a partir do MS.

1.2 Objetivo geral

Propor um *framework* de avaliação de sistemas logísticos de transporte baseado em energia, emissões de CO₂, custos e tempo de viagem.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Aplicar o *framework* proposto em três rotas de exportação de carne bovina partindo do Mato Grosso do Sul, Brasil, até Xangai, China; e
- b) com base nos resultados obtidos, sugerir políticas públicas sobre qual rota de exportação deveria ser priorizada em tomadas de decisão voltadas à sustentabilidade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura desta tese, apresentada a seguir, explora os seguintes tópicos: métodos de avaliação aplicados ao setor de transportes e métodos de avaliação com ênfase na síntese em emergência. A Tabela 1 mostra os artigos considerados nesta revisão, classificados por temas.

Tabela 1. Artigos usados na revisão de literatura.

Temas	Artigos
Métodos de avaliação no setor de transportes	Agostinho <i>et al.</i> (2019); Mahdinia <i>et al.</i> (2018); Mesjasz-Lech e Włodarczyk (2022); Chen <i>et al.</i> (2021); Jeon, Amekudzi, Guensler (2013); Campos <i>et al.</i> (2019); Mishra <i>et al.</i> (2024); Dente e Tavasszy (2018); Jiang <i>et al.</i> (2024); Du Plessis <i>et al.</i> (2023); Wang <i>et al.</i> (2024); De Oliveira <i>et al.</i> (2022); Lopes <i>et al.</i> (2017); Lee, Thomas, Alleman (2018); Inti e Tandon (2021); Vital e Ioannou (2021); Dini, Yaghoubi, Bahrami (2024); Rashidian, Eydi, Roghanian (2024); Octaviansyah <i>et al.</i> (2024); Chen, Hu, Liu (2024).
Métodos de avaliação com ênfase na síntese em emergência	Chen <i>et al.</i> (2017); Cristiano e Gonella (2019); Huang <i>et al.</i> (2018); Meng <i>et al.</i> (2017); Xie <i>et al.</i> (2022); Wu, Fan, Lu (2021); Reza, Sadiq, Hewage (2013); Zhao, Duan, Yu (2023); Federici, Ulgiati, Basosi (2009); Reza, Sadiq, Hewage (2014).

2.1 Métodos de avaliação no setor de transportes

Abordagens têm sido desenvolvidas para avaliar o desempenho no setor de transportes, considerando diferentes metodologias, contextos e escalas de aplicação. Por exemplo, no trabalho de Agostinho *et al.* (2019) foi proposto um procedimento para avaliar a sustentabilidade de operações e processos de produção (ASUPRO), com base no modelo 5SEnSU e no método PDCA (*plan, do, check, and act*). Além do objetivo de propor o procedimento de avaliação, a verificação desse método foi validada e, para tal, utilizou-se como estudo de caso o transporte de soja no Brasil, considerando os modais ferroviários e rodoviários. Os resultados indicaram que o modo ferroviário apresentou um desempenho superior por meio de um indicador sintético de sustentabilidade do sistema (SSIS). Os pesquisadores realizaram uma análise de sensibilidade, e foi sugerido, como política pública, focar na redução da emergência investida no sistema ferroviário (um dos indicadores utilizados no modelo

5SEnSU). No setor rodoviário, deve-se focar nas reduções dos impactos ambientais, representados pelo indicador potencial de aquecimento global.

Além dessa ferramenta, encontrou-se em literatura diferentes métodos para avaliar o sistema de transporte em outras regiões. Mahdinia *et al.* (2018) propuseram um algoritmo baseado em indicadores para medir a sustentabilidade dos sistemas de transporte nos Estados Unidos. Os autores entendem que é crucial mensurar a sustentabilidade de forma abrangente, integrando as dimensões ambiental, social e econômica com subdivisões específicas. O algoritmo utiliza 89 indicadores normalizados e organizados em nove subdivisões, e eles são agregados para formar os índices ambiental, social e econômico. *Posteriormente*, foram agrupados em um índice de sustentabilidade do transporte. Os indicadores receberam pesos por meio do uso de modelos estatísticos, como a análise de componentes principais e a análise fatorial. Como estudo de caso, os autores calcularam os índices de sustentabilidade do transporte para 50 estados e para o Distrito de Columbia. Os resultados mostraram que o Distrito de Columbia, Nova York e Massachusetts apresentaram as maiores pontuações para o índice de sustentabilidade do transporte. Já os menores índices foram apresentados por Mississippi, Wyoming e Dakota do Norte. Os autores destacaram que, no caso de Distrito de Columbia, sua pequena área e sua alta densidade populacional resultaram alta acessibilidade e da eficiência de transporte. Em contraste, o Mississippi teve baixos índices sociais, como altas fatalidades no trânsito e baixa diversidade de modos de transporte. Foi relatado que o algoritmo desenvolvido é útil para avaliar e comparar a sustentabilidade de sistemas de transporte; ele apoia tomadores de decisão a identificar fraquezas e potencial de melhoria.

Modelos de autorregressão vetorial foram usados para analisar as relações dinâmicas entre o consumo de petróleo, o crescimento econômico, as emissões de poluentes e os investimentos em infraestrutura rodoviária. O estudo de Mesjasz-Lech e Włodarczyk (2022) avaliou o impacto da infraestrutura logística no transporte rodoviário sustentável na Polônia, usando o modelo de autorregressão vetorial, entre os anos de 1994 e 2017. Segundo os pesquisadores, o setor de transporte rodoviário é predominante no país, mas representa uma significativa fonte de emissões de poluentes. As variáveis-chave incluíram o comprimento de rodovias, o número de veículos e os gastos gerais com modernização. Já no estudo de Chen *et al.* (2021) foi proposto um modelo inovador, chamado análise de envoltória de dados em rede com

fronteira dupla *Fuzzy*, que avalia a eficiência, considerando incertezas nos dados e abrangendo 29 províncias da China entre 1985 e 2017. Os autores tiveram como objetivo investigar fatores que impulsionam a sustentabilidade no sistema de transporte rodoviário chinês. Eles destacam a necessidade de equilibrar eficiência energética e ambiental devido aos desafios causados por emissões de poluentes e consumo de energia.

Os resultados encontrados por Mesjasz-Lech e Włodarczyk (2022), ao utilizar o modelo de autorregressão vetorial, indicaram que os investimentos em infraestrutura contribuíram para a redução das emissões de monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC), com uma diminuição média anual de 4,42% e 2,97%, respectivamente. Em contrapartida, as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas (PM10 e PM2.5) aumentaram, com taxas anuais médias de crescimento de 1,48%, 3,36% e 2,94%. Os pesquisadores destacaram ainda que, entre 1994 e 2017, os investimentos em infraestrutura rodoviária cresceram 693,13%, o que mostra uma desconexão entre o crescimento econômico (crescimento de 157,64% no PIB da Polônia) e as emissões gerais (que aumentaram de 35 a 215% para o mesmo período). Foi realizada uma análise de causalidade de Granger, e revelou-se que os investimentos em infraestrutura impactaram diretamente a redução de emissões, ao promover maior eficiência no consumo de combustível. Simulações mostraram que choques nos gastos com infraestrutura resultaram uma redução de até 4% nas emissões de PM10 no primeiro ano. Apesar disso, as emissões de NOx apresentaram maior resistência às mudanças, com efeitos durando até 10 anos após os choques nos gastos. Por fim, destacou-se que a modernização da infraestrutura rodoviária pode mitigar parcialmente os impactos ambientais negativos do transporte rodoviário, mas apontaram a necessidade de políticas complementares para atingir um transporte mais sustentável na Polônia.

No estudo de Chen *et al.* (2021) foi proposto um modelo baseado na análise de envoltória de dados, o qual mostrou que o sistema de transporte rodoviário apresentou avanços na eficiência energética e ambiental. Esses avanços foram impulsionados por fatores, como crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) e maior participação do setor terciário no transporte intermodal. A eficiência média geral, medida pelo Índice de Produtividade de Malmquist (MPI), indicou uma evolução consistente, com os melhores desempenhos registrados em províncias que lideraram mudanças tecnológicas e políticas regulatórias. Especificamente, as províncias

tecnologicamente avançadas apresentaram maior eficiência ambiental, enquanto outras enfrentaram dificuldades em acompanhar o avanço da fronteira tecnológica. No âmbito energético, o consumo de energia total variou de 113 mil a 1,1 bilhão de unidades de potência (HP). Já as emissões de dióxido de carbono (CO₂) oscilaram entre 48 mil e 325 milhões de toneladas anuais, com médias de eficiência maiores em regiões que implementaram tecnologias modernas. Além disso, fatores, como qualidade das rodovias e infraestrutura concorrente (ferrovias), foram determinantes na eficiência ambiental. Os autores concluíram que estratégias regionais diversificadas e maiores investimentos em tecnologias de baixo impacto ambiental são essenciais para melhorar a sustentabilidade do transporte rodoviário chinês. Por isto, aconselham políticas que favoreçam a transição para veículos mais eficientes e infraestrutura verde.

Além dos trabalhos anteriores sobre a Polônia e a China, Jeon, Amekudzi e Guensler (2013) avaliaram a sustentabilidade de alternativas de planejamento de transporte na região metropolitana de Atlanta, Estados Unidos, usando um índice composto de sustentabilidade multicritério. O estudo identificou as medidas de desempenho com base na sustentabilidade e nas metas regionais de Atlanta e avaliou as alternativas propostas de transporte e uso do solo. Foram analisados três cenários: o cenário base (2005), além de dois alternativos: o plano de mobilidade para 2030 (Mobility 2030) e um cenário teste (Test Case 2030), que consideraram dimensões de sustentabilidade ambiental, social, econômica e de eficácia do sistema de transporte. Os valores obtidos foram normalizados para cada uma das quatro dimensões do índice de sustentabilidade, que é medido entre 0 e 1 ou 0 e 100%; quanto maior o valor, melhor o desempenho em sustentabilidade. Os resultados mostraram que o Mobility 2030 apresentou o melhor desempenho geral, com um índice composto de sustentabilidade de 94,4%, enquanto o Test Case 2030 e o cenário base alcançaram 76,4% e 71,9%, respectivamente. O desempenho ambiental foi destaque no Mobility 2030, com redução de 55% nas emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC) e de 82% nos óxidos de nitrogênio (NOx) em relação ao cenário base. No entanto, as emissões de CO₂ aumentaram 53% devido ao maior volume projetado de viagens para os dois cenários futuros. A eficácia do sistema se manteve estável. Por outro lado, o Test Case 2030 mostrou um aumento de 230% no uso de terra para atividades econômicas, o que indica maior pressão sobre recursos territoriais, já que 20% do total de terras é dedicado a atividades econômicas regionais. No aspecto social, o

Mobility 2030 melhorou a distribuição de emissões entre grupos socioeconômicos, pois reduziu desigualdades em até 29,4% em comparação ao cenário base. Já o Test Case 2030 mostrou que populações de baixa renda ficaram mais próximas de áreas com alta emissão. Os autores enfatizaram a necessidade de integrar o planejamento de uso do solo ao transporte para otimizar recursos e reduzir impactos ambientais.

Com o aumento populacional, a logística assumiu um papel fundamental no planejamento, na organização e no controle da movimentação de produtos ao redor do mundo. Neste sentido, o transporte rodoviário de cargas foi avaliado por Campos, Simon, e De Campos Martins (2019) que propuseram no trabalho um método para avaliar os impactos do transporte rodoviário de cargas nas três dimensões da sustentabilidade (econômica, ambiental e social). O método foi construído, usando-se uma combinação de sete indicadores quantitativos universais que envolvem as dimensões da sustentabilidade, uma escala de classificação para os impactos e gráficos de radar para apresentar os resultados. Para verificar a aplicabilidade do método, considerou-se como estudo de caso uma grande empresa do setor sucroenergético no Brasil, com foco nas operações de transporte de cana-de-açúcar, distribuição de açúcar e de etanol. Os resultados mostraram que o custo operacional médio foi de US\$ 0,073/ton.km no transporte de cana, US\$ 0,082/ton.km na distribuição de açúcar e US\$ 0,072/ton.km na distribuição de etanol. O custo de atrasos devido ao congestionamento representou aproximadamente 25% do total, destacando-se como um impacto econômico importante. Na dimensão ambiental, a emissão média de CO₂ variou de 98,15 a 112,7 kgCO_{2eq}/h por caminhão, com uma taxa de ocupação de 70–80%, operando de 20 a 24h por dia, o que caracteriza um alto impacto na sustentabilidade. Para a dimensão social, o uso de diesel S-10 reduziu emissões nocivas, mas as operações de transporte de cana-de-açúcar ainda registraram 6 a 10 acidentes com vítimas por ano, o que representa alto impacto. Segundo os autores, o método é de fácil aplicação e mensura os impactos de forma bastante prática. Como sugestões para trabalhos futuros, sugeriu-se o uso de outros indicadores no método, como qualidade e conservação das estradas, interferência no ecossistema e serviços de apoio aos motoristas, entre outras sugestões.

O trabalho de Campos, Simon e De Campos Martins (2019), Mishra *et al.* (2024) investigou a sustentabilidade do transporte rodoviário de cargas na Índia, projetando emissões de carbono até 2050 e avaliando políticas para mitigar esses impactos, em alinhamento com as metas do Acordo de Paris de 2015. Os autores

usaram o modelo ARIMAX para prever o crescimento da frota de veículos comerciais em diferentes cenários de crescimento econômico e estimaram as emissões de CO₂ com base em fatores de emissão, distância percorrida e população projetada de veículos. Os resultados destacaram que as emissões de CO₂ no cenário *business-as-usual* (BAU) podem atingir 801,54 MtonCO_{2eq.} em 2050. Em contraste, a implementação de uma política de sucateamento de veículos com limite de 10 anos poderia reduzir as emissões em 11,3% para veículos pesados e em 6,2% para veículos leves. Políticas de eletrificação de frota (substituição de veículos movidos a combustão por veículos movidos a energia elétrica) apresentaram impacto ainda maior: a substituição agressiva de veículos movidos a diesel por elétricos reduziria as emissões em 35% para veículos pesados e 68% para veículos leves em 2050, segundo os autores. Além disso, os cenários combinando eletrificação agressiva e políticas de sucateamento de 10 anos alcançaram as maiores reduções, com 42% para veículos pesados e 70% para veículos leves, e o fato evidencia a eficácia e a importância dessas políticas integradas. Por fim, concluiu-se que a utilização de frotas movidas a energia elétrica e políticas rigorosas de aposentadoria de veículos antigos são essenciais para mitigar as emissões e alcançar a meta de neutralidade de carbono da Índia até 2070, mesmo que causando maiores custos financeiros.

Assim como os métodos de avaliação no setor de transporte apresentados acima, há uma ampla gama de metodologias que buscam fornecer subsídios para uma tomada de decisão mais eficiente e sustentável, como foco na redução de emissões, eficiência no transporte rodoviário e análise do ciclo de vida de infraestruturas.

Inicialmente, Dente e Tavasszy (2018) exploraram um quadro de fatores de emissão simplificados para transporte rodoviário de carga com foco na avaliação e na recomendação de políticas de mitigação de emissões. O estudo abordou a dependência da redução de gases de efeito estufa em estratégias políticas e a aplicação de modelos de emissão. Para isso, os autores compararam dois modelos existentes: o EcoTransIT World e o Ligterink, analisando estratégias de mitigação como a redução de carga, a distância percorrida, o tempo de viagem e o peso do veículo vazio. Os resultados indicaram que, no modelo EcoTransIT World, a redução da distância em 10% gerou uma redução de 5721 gCO₂/ton.km (tonelada transportada por quilômetro). A mudança para um veículo mais eficiente economizou 5575 gCO₂/ton.km. Já no modelo Ligterink, a redução de 10% no peso do veículo foi a mais

eficiente. A ação economizou até 3730 gCO₂/ton.km, enquanto a redução de 10% no tempo e 10% na distância geraram economias de 2980 gCO₂/ton.km e 2470 gCO₂/ton.km, respectivamente. Os autores destacaram que o modelo Ligterink é mais flexível; permite ajustes mais precisos. Já o EcoTransIT World é mais adequado para situações específicas. Assim, concluiu-se que a adoção de veículos mais leves e o aumento da eficiência no uso de carga e rotas, como forma de reduzir as emissões no setor rodoviário, deveriam ser priorizados.

O transporte de cargas na província de Zhejiang, China, utilizando a mudança do modal rodoviário para o hidroviário, foi avaliado por Jiang *et al.* (2024) com base em dados empíricos de mais de 200 viagens realizadas por 92 empresas no âmbito de um projeto-piloto nacional. Os autores buscaram quantificar a redução de emissões de CO₂, usando uma metodologia *bottom-up*, que considera especificidades operacionais, como tipo de veículo/navio, combustível e distância. O estudo foi elaborado, considerando-se todos os elos do transporte porta a porta, incluindo trechos de ligação rodoviária, operações portuárias e travessia de eclusas. Os resultados mostraram que a substituição do transporte rodoviário pelo hidroviário chegou a uma redução total de 45.907 toneladas de CO₂, para um volume de carga transportado de 7,0 milhões de toneladas. Sugeriu-se que fatores, como a vantagem de distância, a densidade de viagens e a eficiência operacional dos portos e eclusas, influenciam significativamente o potencial de redução de emissões. Simulações mostraram que um aumento de 10% no volume transportado por via hídrica pode ampliar em 6,5% a redução de CO₂, enquanto a otimização do tempo de espera em eclusas pode reduzir as emissões em 1,5%. A substituição do diesel por eletricidade nas operações portuárias proporcionaria adicional redução de 0,4%. Os autores, porém, concluem que, embora o transporte hidroviário tenha menor emissão por tonelada-quilômetro, a mudança do modal rodoviário para o hidroviário deve considerar cuidadosamente aspectos econômicos, técnicos e de infraestrutura para garantir sua efetividade ambiental. O trabalho contribui para a formulação de políticas públicas com base em evidências e pode ser replicado em outras regiões com condições semelhantes.

Nesta tese, a avaliação ambiental, que usa emergia no transporte por rodovias e outros indicadores, é aplicada em um estudo de caso que envolve o transporte de carne bovina, isto é, uma carga refrigerada. Com o mesmo objeto de estudo, Du Plessis *et al.* (2023) analisaram o consumo de combustível e as emissões no

transporte rodoviário refrigerado. Utilizaram dados reais de uma empresa sul-africana de logística. Para o estudo de caso, consideraram-se 147 viagens de longa distância, percorrendo quase 200 mil km e transportando 3.693 toneladas de carga. O trabalho focou-se em fatores, como tipo de reboque, rota, peso da carga, distâncias percorridas vazias e carregadas e uso de refrigeração. Isso mostrou um consumo de 84.588 litros de diesel pelos veículos, gerando 274 tonCO_{2eq}. A refrigeração contribuiu para o consumo, especialmente para cargas congeladas (-25°C), com média de 2,06 L/h, em comparação a 1,57 L/h para outros produtos acima de 0°C. Além disso, o fator de carga vazio e o peso da carga também impactaram a intensidade das emissões (em gCO_{2eq}/t-km), que aumentaram proporcionalmente com maior percentual de rodagem vazia e diminuíram com maior fator de carga. Destacou-se que o consumo de reboques *interlink* foi 0,04 a 0,06 L/km maior que os semirreboques refrigerados devido à maior capacidade de carga. Além disso, verificou-se que viagens em direção ao interior tiveram maior consumo devido ao ganho acumulado de elevação. Para aumentar a eficiência e reduzir emissões, os autores sugeriram melhorias, como treinamento de motoristas, otimização de rotas, uso de veículos baseados em padrões de desempenho e práticas de pré-resfriamento de carga.

A seguir são apresentados estudos para o Brasil, com diferentes propostas. Enquanto um analisa o impacto do Plano Nacional de Logística 2035 no país (Wang *et al.*, 2024), o outro trata de rotas de exportação de soja (De Oliveira *et al.*, 2022).

Os impactos econômicos e ambientais do Plano Nacional de Logística 2035 (PNL2035) no Brasil foram avaliados por Wang *et al.* (2024). Eles destacaram os altos custos de transporte no Cerrado como barreira à competitividade agrícola. Usando o modelo SIMPLE-G-Brazil, que integra dados geoespaciais e econômicos, foram analisados custos logísticos, mudanças no uso da terra e emissões de carbono. O PNL2035 pode reduzir os custos de transporte em até 23% no Cerrado, o que promove uma expansão agrícola de 10,7% em Mato Grosso, enquanto o Sudeste-Sul reduziria a demanda por terras, com queda de até 16% nos aluguéis. Nacionalmente, o impacto líquido no uso da terra seria pequeno, com aumento de 0,35%. A expansão ferroviária reduziria emissões de transporte em 11,9 MtCO_{2eq}, e, em cenários de alta mobilidade de insumos, as emissões nacionais cairiam em até 30,7 MtCO_{2eq} (1,57% do total do Brasil em 2017). No entanto, o Cerrado enfrentaria um aumento local de até 88,9 MtCO_{2eq}, compensado parcialmente pela regeneração de pastagens no Sudeste-Sul. Segundo os autores, é importante desenvolver políticas de conservação

para mitigar o desmatamento no Cerrado, além de propor uma governança eficaz para equilibrar ganhos econômicos e sustentabilidade ambiental.

O segundo estudo para o Brasil, como destacado anteriormente, analisou a eficiência das rotas de exportação de soja no estado de Mato Grosso sob as dimensões econômica, social e ambiental, utilizando a análise de envoltória de dados (DEA). Este trabalho foi desenvolvido por De Oliveira *et al.* (2022), e, nele, avaliaram-se 21 rotas, 6 unimodais e 15 intermodais. Na avaliação, consideram-se o impacto dos custos logísticos, as emissões de CO₂ e os indicadores sociais, como PIB ajustado e IDH. Os resultados mostraram que a rota DMU16 (*decision-making unit* ou unidade de tomada de decisão), intermodal (rodoviária-ferroviária), alcançou a maior eficiência média (85,1%) e se destacou pelas menores emissões e custos logísticos, devido à predominância do transporte ferroviário. Rotas para portos no Arco Norte, como a DMU6, apresentaram alta eficiência ambiental (83,3%) e social (80,9%), enquanto rotas unimodais tiveram desempenho inferior, com 60% das rotas registrando eficiência abaixo de 50%. A baixa eficiência em muitas rotas foi atribuída às grandes distâncias rodoviárias (média de 1.700 km) e à falta de modernização da frota ferroviária. Foi sugerido fortalecer a intermodalidade, com investimentos em terminais de transbordo próximos às áreas produtivas e melhorias na infraestrutura ferroviária, fato que quer reduzir custos e emissões, além de promover ganhos socioeconômicos para a região.

Ainda para o Brasil, o transporte de soja oriunda do estado de Mato Grosso foi avaliado por meio de um projeto de simulação de eventos discretos, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão estratégica sobre rotas de exportação no Brasil. Neste estudo, Lopes *et al.* (2017) buscaram simular diferentes cenários logísticos a partir de microrregiões produtoras, utilizando, para tal, o software ProModel® e considerando critérios, como custos totais das rotas e capacidade disponível nos portos. O trabalho foi elaborado com base em dados reais de produção, exportação e infraestrutura logística e modelou o sistema com diferentes configurações de rotas unimodais e multimodais (rodoviárias, ferroviárias e hidroviárias). Foram simulados quatro cenários, incluindo a configuração atual do sistema e as possibilidades futuras com a inclusão de novas infraestruturas. Os resultados mostraram que a rota mais eficiente envolve a utilização do Porto de Vitória, seguida pelos portos da região Norte (Santarém e Vila do Conde), devido à combinação entre menores custos logísticos e disponibilidade de capacidade operacional. Sugeriu-se que, embora o Porto de Vitória

apresente maior eficiência no modelo, sua limitação física e competição com outras cargas reduzem seu potencial efetivo; por isto, é necessária sua expansão. Além disso, os portos da região Norte mostraram ser alternativas estratégicas, sobretudo para exportações com destino à Europa. Os portos do Sul e do Sudeste se mostram mais viáveis para exportações ao mercado asiático. O estudo também evidenciou que, apesar da existência de rotas economicamente mais vantajosas, fatores operacionais e de infraestrutura ainda forçam decisões logísticas não adequadas. Embora o modelo apresente soluções baseadas no aspecto econômico, não foram abordadas questões operacionais, como restrições ambientais e políticas regionais. Além disso, a simulação limita-se ao Mato Grosso; ela não considera a concorrência logística com outros estados exportadores.

Da mesma forma que estudos foram realizados para o território brasileiro, foram encontradas em literatura diferentes perspectivas de avaliação do sistema de transporte para os Estados Unidos. O primeiro estudo relatado foi desenvolvido por Lee, Thomas e Alleman (2018) e teve como objetivo aprimorar a análise de custo do ciclo de vida para projetos de infraestrutura rodoviária. O estudo integrou custos de usuários da via ao processo recomendado pela Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos, além de outros relatórios para a construção estratégica de pavimentos. A abordagem foi validada por meio do projeto SR-91 *Corridor Improvement Project*, na Califórnia, com um custo total estimado de \$1,4 bilhão. Os autores avaliaram dois cenários: o primeiro com uso de pavimento de concreto Portland (PCCP); o segundo com substituição por pavimento continuamente reforçado (CRCP) e pavimento de concreto asfáltico (ACP) em áreas específicas. Os resultados destacaram que o CRCP (segundo cenário) tem custos iniciais aproximadamente 20% superiores ao PCCP (primeiro cenário). Além disso, os custos de manutenção anual do ACP foram de 8 a 9 vezes maiores que os do PCCP, devido à necessidade de intervenções mais frequentes, como fresagem e recapeamento a cada 10 anos. Em relação aos custos dos usuários durante as obras de manutenção, os resultados mostraram que o número de fechamentos noturnos necessários para o CRCP foi cerca de 30% maior do que para o PCCP, o que aumenta os custos e o impacto no tráfego. A análise de custo total do ciclo de vida evidenciou que o PCCP apresentou melhor custo-benefício no longo prazo, com menores custos iniciais e menores impactos no tráfego durante as manutenções.

Ainda para os Estados Unidos, o objetivo do estudo foi desenvolver uma estrutura para seleção de *designs* sustentáveis de rodovias, integrando análises de ciclo de vida econômico, ambiental e social. O trabalho de Inti e Tandon (2021) foi aplicado a quatro *designs* de pavimentos para uma rodovia de seis pistas em El Paso, Texas. Os autores usaram um modelo-processo de hierarquia analítica e otimização por análise envoltória de dados para identificar o *design* mais sustentável. Os resultados mostraram que o *Design 4*, baseado em pavimento contínuo de concreto reforçado, foi classificado como o mais sustentável com peso de 0,48, seguido pelos *Designs 1* (pavimento flexível tradicional; 0,24), 3 (pavimento flexível com variações nos materiais e nas proporções da base; 0,18) e 2 (similar ao 1 com curso de fricção permeável; 0,10). Apesar de possuir custos de construção mais altos (US\$ 3,9 milhões por milha) e maiores emissões durante a produção do material (11.789 toneladas de CO₂), o *Design 4* apresentou menores emissões no ciclo total (511.809 toneladas de CO₂) e custos reduzidos para os usuários devido à menor necessidade de manutenção (US\$ 158 mil contra até US\$ 1,08 milhão dos outros designs). Em termos ambientais, o *Design 4* teve melhor desempenho em consumo energético total (2,9E+11 BTU) e em emissão de poluentes, como NO_x e SO₂, durante o uso e a manutenção, mostrando-se de 10% a 20% mais eficiente nesses aspectos se comparados aos outros designs. No critério social, o *Design 2*, que utiliza um curso de fricção permeável, reduziu o ruído em 3 decibéis e diminuiu os custos com barreiras acústicas (US\$ 1,34 milhão contra US\$ 1,92 milhão do *Design 4*). Os autores destacaram a importância de integrar múltiplas dimensões da sustentabilidade e a normalização dos dados para facilitar a tomada de decisão. Os resultados sugerem que o *Design 4* oferece benefícios a longo prazo, apesar de desafios iniciais de custo e emissões, o que demonstra o impacto positivo de sua manutenção reduzida no ciclo de vida total da rodovia.

Assim, como os anteriores, o artigo desenvolvido por Vital e Ioannou (2021) foi aplicado para os Estados Unidos. Investigou-se a otimização de rotas de caminhões, considerando-se as restrições das regras de horas de serviço e a disponibilidade de estacionamentos para descanso no país. Com isso, buscou-se mitigar problemas, como acidentes, custos adicionais e emissões de carbono relacionados à escassez de vagas de estacionamento para caminhões. Foi desenvolvido um modelo baseado no problema de caminho mais curto com restrições de recursos, integrando algoritmos de correção de rótulos para otimizar trajetos e cronogramas. O modelo inclui restrições

de tempo, como as janelas de disponibilidade dos estacionamentos, e parâmetros do sistema, como tempo e custo de viagem. Em um estudo de caso, os custos associados à negligência da disponibilidade de estacionamento foram simulados, o que mostrou aumento no tempo total de viagem e nos custos, devido a desvios forçados e a multas por violações das regras de horas de serviço. Resultados indicaram que a integração de informações sobre disponibilidade de estacionamento reduz custos e acidentes. Por exemplo, rotas planejadas com base nas janelas de disponibilidade apresentaram redução no tempo de parada fora das áreas regulamentadas e queda no consumo de combustível. O estudo mostrou que alternativas que ignoram essas informações aumentam significativamente o risco de infrações e custos operacionais. Indicou-se que políticas públicas priorizem investimentos em infraestrutura de estacionamento e sistemas inteligentes de informação, para garantir conformidade às regras de horas de serviço e minimizar impactos econômicos e ambientais no transporte de cargas.

O transporte de cargas entre múltiplas origens e destinos, utilizando diferentes modos de transporte, foi avaliado por Dini, Yaghoubi e Bahrami (2024), com o objetivo de apoiar empresas de logística na seleção de rotas otimizadas sob múltiplos critérios, incluindo-se custo, tempo, confiabilidade e impactos ambientais, como emissões de CO₂ e ruído. Os autores propuseram um modelo matemático em duas fases: a primeira, de planejamento tático, utiliza Análise Envoltória de Dados (DEA) para filtrar as rotas mais eficientes; a segunda, operacional, adota um modelo multiobjetivo que considera diferentes combinações modais e permite a consolidação de cargas entre períodos, mesmo com penalidades por atraso. Os resultados mostraram que as rotas multimodais, que combinam trechos rodoviários, marítimos e ferroviários, tendem a ser mais vantajosas porque permitem reduzir tanto custos logísticos, quanto impactos ambientais. Entre as alternativas analisadas, a melhor rota selecionada pelo modelo conecta Bangkok a Hanoi por meio de transporte rodoviário até o porto, navegação marítima até Da Nang e, em seguida, rodoviário até o final do destino. Essa rota se destacou por equilibrar tempo de transporte moderado, menor impacto ambiental e boa confiabilidade dos modais envolvidos. Além disso, a escolha de veículos com características específicas, como maior velocidade e menor emissão, contribuiu para a superioridade dessa alternativa.

Ainda na busca por selecionar rotas mais confiáveis e ambientalmente sustentáveis, mas agora no contexto iraniano, Rashidian, Eydi e Roghanian (2024) avaliaram o transporte de cimento por meio de uma rede multimodal rodoviária-

ferroviária. Os autores analisaram uma rede composta por três níveis: nós de origem (fábricas produtoras de cimento), nós intermediários (terminais intermodais, como estações ferroviárias) e nós de destino (pontos de consumo). Os arcos representam os trechos de ligação entre esses nós e podem ser rodoviários, ferroviários ou uma combinação de ambos. O estudo buscou integrar confiabilidade e critérios ambientais à seleção de rotas, considerando que interrupções nos nós (como falhas de produção, greves, desastres naturais) e nos arcos (como acidentes, emissões de carbono, rotas inseguras) impactam negativamente o desempenho logístico. Para abordar essas variáveis, os autores aplicaram um modelo híbrido que combina os métodos DANP, COCOSO e FMEA Criticality, o que permite avaliar os riscos, atribuir níveis de confiabilidade a cada elemento da rede e determinar a melhor rota entre origens e destinos. O estudo de caso em uma rede de 14 nós e 26 arcos mostrou que a rota ótima envolve o uso de determinados terminais e conexões com menor risco de falhas e menor impacto ambiental. Essa rota destacou-se por contar com vias seguras, baixa probabilidade de interrupções operacionais e níveis reduzidos de emissão de poluentes.

O estudo de Octaviansyah *et al.* (2024) teve como objetivo identificar a melhor rota de conexão do interior para o porto de Boombaru, Indonésia, considerando critérios, como uso do solo, acessibilidade, estrutura do pavimento e geometria. Foi utilizada a Análise Multicritério para avaliar quatro rotas alternativas, baseando-se em entrevistas com especialistas e gestores rodoviários, além de questionários aplicados a 400 usuários de estradas. Os resultados mostraram que a rota B, conectando Lampung a Palembang, obteve a maior pontuação total (3565 pontos), sendo considerada a mais eficiente. A rota destacou-se em critérios, como acessibilidade (3787 pontos) e uso do solo (3521 pontos), devido ao acesso direto a áreas industriais, centros de distribuição e menor congestionamento urbano. Além disso, sua estrutura reduz o consumo de combustível e as emissões de gases. A rota D apresentou o melhor desempenho em critérios geométricos (3797 pontos), enquanto a rota C foi destacada em conectividade (2570 pontos). Por outro lado, as rotas A e C tiveram desvantagens em congestionamento e vulnerabilidade a deslizamentos, e a rota D enfrentou limitações de largura e condição das vias. Foram recomendados investimentos em infraestrutura rodoviária com foco na interconectividade entre o interior e o porto, com maior atenção à acessibilidade e aos aspectos geométricos, considerando sua relevância para a eficiência logística regional.

Ademais, um modelo de otimização de rotas de baixo carbono para transporte de carga multimodal foi proposto por Chen, Hu e Liu (2024), com o propósito de reduzir custos de transporte e emissões de carbono. O estudo focou em quatro categorias de carga, variando em valor agregado e sensibilidade ao tempo, e aplicou um modelo baseado em algoritmos genéticos adaptativos e amostragem de Monte Carlo. Foram utilizados coeficientes de consumo energético, emissões de carbono e custos unitários para simular e avaliar diferentes rotas. Os resultados indicaram que, para cargas de baixo valor e pouca urgência, as rotas ferroviárias e hidroviárias apresentaram o menor custo total (891,57 RMB) e emissões de carbono (244,27 kgCO₂). Já para cargas de alto valor e alta urgência, o transporte rodoviário foi predominante; priorizou-se a pontualidade, embora com custos mais elevados (3.504,64 RMB) e emissões maiores (888,05 kgCO₂). O aumento do imposto sobre carbono (até 140%) mostrou ser uma ferramenta eficaz para incentivar a migração do transporte ferroviário para o hidroviário, reduzindo emissões. Além disso, a substituição de caminhões a diesel por elétricos e o aumento no uso de eletricidade verde (acima de 80%) mostraram impacto positivo na redução de emissões e custos. Os autores propuseram políticas públicas voltadas para subsídios ao transporte multimodal de baixo carbono, promoção de veículos elétricos e ampliação da energia limpa, além de ajustes no imposto sobre carbono.

A revisão de literatura evidenciou avanços em estratégias de mitigação de emissões e otimização logística no transporte rodoviário e noutros modais. Contudo, pontua-se que estudos ainda podem contribuir ao considerar a necessidade de adaptar soluções às especificidades regionais (Wang *et al.*, 2024). Estudos apontaram que melhorias na infraestrutura rodoviária, com foco na interconectividade entre regiões produtivas e portos, são cruciais para reduzir custos logísticos e emissões (De Oliveira *et al.*, 2022; Octaviansyah *et al.*, 2024). Além disso, recomendaram-se maior eficiência e maior otimização de rotas refrigeradas (Du Plessis *et al.*, 2023).

Foi possível perceber ainda que avaliações da sustentabilidade no setor de transportes estão amplamente difundidas na literatura. Estudos avaliaram a sustentabilidade em setores de transporte para países, como Brasil, China, Estados Unidos, Índia e Polônia, e incluíram abordagens multicritério, uso de algoritmos complexos, análise de autorregressão, lógica *Fuzzy*, métodos de simulação, entre outras metodologias. Sugeriram-se políticas públicas baseadas principalmente nos aspectos ambientais e econômicos, como a redução dos custos com infraestrutura, o

uso otimizado de recursos e a redução das emissões de CO₂. Vale destacar que sugestões para políticas públicas estão presentes na maioria dos artigos em literatura, o que sugere ser esse um item indispensável nas publicações científicas atuais. Contudo, entende-se que o tomador de decisão necessita de ações mais específicas com base em estudos de casos reais, utilizando-se de métricas de fácil entendimento.

2.2 Métodos de avaliação com ênfase na síntese em emergia

Entre os métodos utilizados para avaliar os impactos ambientais, incluem-se a avaliação do ciclo de vida (ACV), a análise de fluxo de materiais, a pegada ecológica e a análise de entrada-saída ou *input-output analysis* (Chen *et al.*, 2017). Além desses métodos, é importante destacar que a síntese em emergia também vem sendo empregada em literatura e se destaca por apresentar características diferentes das demais métricas, como, por exemplo, uma avaliação que considera o lado do doador de recursos.

No setor de transportes, a síntese em emergia tem sido empregada devido à sua capacidade de avaliar aspectos socioecológicos de infraestrutura de forma integrada. Um exemplo relevante é o trabalho de Cristiano e Gonella (2019), que analisou um sistema de expansão rodoviária construído na Itália. Essa análise possibilitou a comparação com a alternativa de não construir a rodovia, estabelecendo cenários de mobilidade que sugeriam a adaptação parcial do sistema ao modal ferroviário. A contabilidade em emergia realizada expressou os resultados em termos de emergia total investida, emergia por passageiro-quilômetro e emergia por tonelada-quilômetro.

Conforme os pesquisadores, a expansão da rodovia foi justificada por supostas economias ambientais e sociais líquidas relacionadas ao consumo de combustível, à poluição do ar e à satisfação da demanda. Em contraste, os resultados da análise não evidenciaram nenhuma vantagem socioambiental da expansão para os indicadores calculados. A análise em emergia revelou que os principais insumos derivam da construção de elementos complexos de infraestrutura civil, como túneis e viadutos, do combustível utilizado pelos veículos e seus serviços associados, e do trabalho dos motoristas (mão de obra). Assim, o esforço, para melhorar o impacto ambiental esperado pelos tomadores de decisão, acaba gerando um efeito contrário ao esperado, anulando os benefícios esperados. Os autores sugeriram que, a curto

prazo, a construção de uma nova infraestrutura que incentive uma mudança modal parcial para o transporte ferroviário seria uma estratégia conveniente. Já a longo prazo, deve-se focar no progresso cultural para diminuir o metabolismo social consumista que, paralelamente, resultaria em economias na infraestrutura de transporte.

Além do estudo de Cristiano e Gonella (2019), outros trabalhos aplicaram a emergia para investigar o setor de transporte no mundo. A saber, Huang *et al.* (2018) estudaram o transporte terrestre em nível nacional na China, com o objetivo de avaliar a quantidade, a qualidade e a distribuição do uso de recursos em nove modalidades de transporte, considerando perspectivas monetária, energética e em emergia para o ano de 2012. De acordo com os autores, o uso das três abordagens reflete diferentes características do setor de transportes (por exemplo, tecnologia dispendiosa, intensidade energética e laboral, necessidade de infraestrutura, tempo de substituição de recursos) e as abordagens podem ser utilizadas para a elaboração de políticas orientadas para diferentes fins.

Os modos de transporte de passageiros e de carga avaliados incluem automóveis particulares, táxis, ônibus urbanos, ônibus de longa distância, metrô, trens regulares, trens de alta velocidade, caminhões e trens regulares para transporte de mercadorias. Os resultados mostraram que o automóvel particular é o modo menos eficiente, pois consome a maior parte dos recursos monetários, energéticos e ambientais, e apresenta a menor eficiência de entrada-saída e ambiental.

Entretanto, a modalidade mais eficiente depende do critério de avaliação, já que a classificação das modalidades é diferente para os diferentes métodos. Sob a perspectiva monetária, os trens regulares e de alta velocidade destacaram-se como mais eficientes para o transporte de passageiros. Em termos de demanda cumulativa de energia, o trem regular e o metrô apresentaram o menor custo unitário. Na análise em emergia, considerando o suporte ambiental, o ônibus urbano para passageiros e o trem regular para transporte de mercadorias apresentaram o melhor desempenho por unidade de serviço. Foi recomendado, como ações políticas mais urgentes, coordenar o sistema ferroviário com o sistema rodoviário e melhorar seus fatores de carga para minimizar o custo ambiental medido pela síntese em emergia.

Semelhante a pesquisas prévias, a síntese em emergia foi utilizada com outros indicadores para fornecer uma análise mais abrangente de sistemas de transporte. Meng *et al.* (2017) estudaram a eficiência energética do sistema de transporte urbano

em Xiamen, China, justificando que o setor de transportes desempenha um papel fundamental no consumo de energia e nos impactos ambientais associados às áreas urbanas. Os autores avaliaram diversos indicadores para comparar dois sistemas de transporte, o BRT (*Bus Rapid Transit*) e o NBT (*Normal Bus Transit*). Os indicadores considerados são: análise de fluxo de materiais, demanda de energia, análise de exergia, energia por passageiro-km, índice de sustentabilidade em energia e emissões de CO₂. Todos os indicadores foram calculados para todas as fases do ciclo de vida das infraestruturas, veículos e combustíveis, o que permitiu uma análise comparativa entre os dois sistemas de transporte.

Os resultados de Meng *et al.* (2017) mostraram que o sistema BRT apresenta melhor desempenho ambiental e eficiência energética em relação ao NBT, devido a maior eficiência no uso de recursos, a maior ocupação dos veículos e a menor dependência de combustíveis fósseis. O NBT requer aproximadamente 5 vezes mais energia por passageiro-quilômetro em comparação ao BRT. Essa diferença significativa mostra a maior eficiência do BRT na utilização de recursos ambientais, o que reflete menor pressão sobre os sistemas ecológicos e maior viabilidade para um transporte sustentável. Da mesma forma, o índice de sustentabilidade em energia mostrou que o BRT possui um desempenho melhor que o NBT em relação à sustentabilidade, já que o BRT alcançou um índice de 2,14, contra 0,09 do NBT. Os pesquisadores destacaram que a análise integrada permite capturar custos ocultos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos sistemas de transporte e fornece evidências claras da importância de uma abordagem multidimensional para o planejamento de políticas públicas sustentáveis. A pesquisa concluiu que o BRT, devido à sua maior eficiência e ao seu menor impacto ambiental, representa uma alternativa mais sustentável para o desenvolvimento urbano.

Outra modalidade de transporte relevante é o marítimo. O sistema logístico portuário de Xangai foi estudado por Xie *et al.* (2022). Os autores destacaram que o rápido desenvolvimento desse setor na China tem gerado aumento no consumo de energia e emissões de gases poluentes, o que impacta negativamente o meio ambiente. O estudo utilizou um modelo de pegada ecológica baseado na energia (modelo de pegada ecológica-energia), para analisar o desempenho ambiental do porto de Xangai entre 2009 e 2018, e integrou variáveis, como pegadas de energia, água, recursos biológicos, poluição e transporte. Os resultados mostraram que a pegada de energia foi o principal componente da pegada ecológica total do porto,

representando 54% do total, seguida pela pegada de poluição que variou entre 23,6% e 26,6% no período analisado. A eficiência logística, medida pela relação entre pegada ecológica e produtividade, melhorou ao longo do tempo, mas ainda enfrenta desafios. Os pesquisadores concluíram o estudo com a afirmação de que o desenvolvimento sustentável do porto de Xangai exige estratégias, como melhoria de infraestrutura, modernização de equipamentos, transição para energias limpas e adoção de políticas ambientais mais rigorosas.

Wu, Fan e Lu (2021) avaliaram o sistema de transporte na China com a justificativa de que há um consumo excessivo de energia nesta área, e isso vem causando problemas ambientais e dificultando o desenvolvimento sustentável. O estudo de caso considerou a quarta maior província do país, Qinghai, pois é uma região com abundância de recursos naturais e com tendência de desenvolvimento. Foram calculados o índice de rendimento de energia, o índice de carga ambiental e o índice de sustentabilidade de energia para identificar os benefícios econômicos e ambientais do sistema para os anos operacionais de 2010 a 2017. Constatou-se nos resultados que o índice de rendimento em energia do sistema está positivamente correlacionado ao índice de sustentabilidade, e a tendência de mudança é geralmente consistente. Além disso, foram realizadas simulações de cenários futuros com mudanças na taxa de transporte de rodovias para ferrovias em 10% e 20%, redução no uso de recursos não renováveis em 10% e 20%, e ajuste na velocidade de desenvolvimento econômico com aumento de 10% e 20%. Nas simulações, os resultados mostraram que, para cada indicador de energia avaliado, há uma mesma tendência. Os valores permanecem constantes até o ano de 2040 para a carga ambiental e o rendimento em energia, quando o cenário 3 (mudança em 20% nas variáveis) começa a se destacar com um melhor desempenho em relação à situação atual (cenário 1) e variação em 10% das variáveis (cenário 2). Por fim, foi destacado pelos autores que a redistribuição na proporção de rodovias e ferrovias possui o maior impacto no desenvolvimento sustentável no sistema de transporte da região de Qinghai.

No setor de infraestrutura de transportes, a energia tem sido frequentemente combinada com outras metodologias de avaliação. Reza, Sadiq e Hewage (2013), por exemplo, propuseram uma abordagem que integra a análise de energia com métodos *fuzzy*. Para os autores, um aspecto controverso da síntese de energia é a falta de pesquisa que caracteriza as incertezas no processo de avaliação, que poderiam surgir

da análise de vários componentes e fluxos em sistemas mais complexos. Isso poderia prejudicar a confiabilidade dos resultados. Logo, a aplicação da teoria da lógica *fuzzy* facilitaria a avaliação gradual das UEVs (*unit energy values* ou valores unitários em energia), como um conjunto de UEVs possíveis. Essa combinação de métodos foi aplicada a um sistema de infraestrutura de transporte que considera o uso de pavimento asfáltico e pavimento de concreto. Em relação ao estudo de caso, os autores encontraram que o valor total de energia de um sistema rodoviário para o cenário convencional com pavimento asfáltico é cerca de 7,5% maior do que o pavimento de concreto. A análise de incerteza mostrou que, mesmo quando duas alternativas têm valores de energia total muito parecidos, a incerteza natural do processo não muda os resultados nem as escolhas, desde que as UEVs sejam confiáveis em pelo menos 50%. Os autores sugeriram que a modelagem baseada em *fuzzy* pode fornecer melhor *insight* para pesquisadores de energia. Complementaram ainda que a metodologia desenvolvida fornece transparência e deveria ser parte integrante dos processos de tomada de decisões baseados em energia.

Zhao, Duan e Yu (2023) analisaram as emissões de carbono associadas à construção de infraestrutura na província de Liaoning, China, incluindo o setor de transporte, utilizando uma combinação da energia e o modelo STIRPAT (ferramenta que analisa as relações entre os sistemas humanos e os ecossistemas), para prever picos de emissões e propor cenários de mitigação. O estudo considerou seis fatores principais, incluindo taxa de urbanização, intensidade energética, desenvolvimento de infraestrutura viária, energia per capita, densidade de energia e estrutura de transporte. Os resultados mostraram que as emissões totais de carbono aumentaram de 475,65 milhões de toneladas em 2006 para 676,28 milhões de toneladas em 2014, com uma taxa média anual de crescimento de 4,5%. Em 2020, as maiores contribuições foram de edifícios residenciais (44%) e públicos (42%), enquanto infraestrutura municipal e consumo de energia representaram apenas 4% e 1%, respectivamente. A análise do modelo revelou que o aumento de 1% na taxa de urbanização resulta 0,599% mais emissões, enquanto a intensidade e densidade de energia estão negativamente correlacionadas às emissões, o que indica que avanços tecnológicos e otimização de uso de terra podem mitigar os impactos ambientais.

Na sequência, Zhao, Duan e Yu (2023) modelaram quatro cenários: inercial, mitigação, economia de energia e baixo carbono, cada um subdividido em esquemas com combinações de taxas de crescimento. Entre 16 esquemas propostos no

trabalho, o cenário de baixo carbono mostrou o melhor desempenho, com pico de emissões em 2030 de 859 milhões de toneladas, alcançando reduções ao adotar desenvolvimento moderado de urbanização, consumo energético per capita reduzido e melhorias na estrutura de transporte e intensidade em energia. Para reduzir emissões, foram sugeridas políticas públicas focadas na moderação do crescimento urbano, na promoção de tecnologias limpas e na otimização da infraestrutura de transporte com ênfase em ferrovias e vias aquáticas.

A exemplo de estudos anteriores, a síntese em energia foi utilizada em conjunto com outros métodos, como a análise de fluxo de materiais e a análise de energia incorporada. Uma análise é o trabalho de Federici, Ulgiati e Basosi (2009), cujo objetivo foi realizar uma comparação do impacto energético e ambiental de diferentes modalidades de transporte (aéreo, rodoviário e ferroviário). A pesquisa abrangeu desde a construção de infraestruturas e veículos até a operação desses sistemas; considerou o transporte de passageiros e cargas em uma rota de 800 km entre Nápoles e Milão, na Itália. Os autores observaram que o transporte aéreo tem um impacto ambiental competitivo em relação aos modos terrestres, especialmente em distâncias superiores a 400 km para passageiros. Para transporte de cargas, o transporte rodoviário apresentou a menor intensidade de energia ($1,25E+11$ seJ/t-km), seguido pelas ferrovias intermunicipais e de alta velocidade, enquanto o transporte aéreo foi o mais intensivo em energia em curtas distâncias. A intensidade de material (kg/p-km; passageiro km) para transporte aéreo variou de 1,54 em curtas distâncias (238 km) para 0,59 em longas distâncias (4000 km), enquanto a ferrovia de alta velocidade manteve-se mais alta, devido à grande demanda de infraestrutura.

O transporte rodoviário mostrou-se menos intensivo em material e energia para cargas, devido ao alto fator de carga de caminhões. Em termos de intensidade de energia (MJ/p-km), o transporte aéreo ultrapassou o rodoviário e o ferroviário em distâncias superiores a 1000 km. No entanto, sob um fator de carga otimista de 80%, o aéreo superou o rodoviário em eficiência energética em distâncias superiores a 460 km e a ferrovia de alta velocidade acima de 350 km. Foi destacado ainda que o transporte ferroviário intermunicipal é consistentemente mais eficiente em energia e material para passageiros, enquanto caminhões dominam na eficiência para cargas em curtas e médias distâncias. Contudo, a alta intensidade material e a energia da infraestrutura de trens de alta velocidade questionam sua sustentabilidade, particularmente em terrenos montanhosos como os Apeninos.

Na análise de emergência realizada, o transporte aéreo mostrou-se competitivo em relação às modalidades terrestres para passageiros em distâncias superiores a 400 km, especialmente quando considerado um fator de carga de 80%, em que apresentou menor intensidade de emergência (seJ/p-km) do que rodovias e ferrovias. Para transporte de cargas, o transporte rodoviário apresentou a menor intensidade de emergência ($1,25\text{E}+11 \text{ seJ/t-km}$), seguido pelas ferrovias intermunicipais e de alta velocidade, enquanto o transporte aéreo foi o mais intensivo em emergência em curtas distâncias. Contudo, acima de 800 km, o aéreo tornou-se mais competitivo que as ferrovias. Federici, Ulgiati e Basosi (2009) sugeriram priorizar sistemas de transporte locais e metropolitanos menos intensivos em recursos em vez de investir em extensas infraestruturas de alta velocidade.

Com o objetivo de avaliar a sustentabilidade de sistemas de infraestrutura civil, Reza, Sadiq e Hewage (2014) propuseram uma avaliação que integra a emergência e a ACV. Essa abordagem permite mensurar os impactos ambientais, sociais e econômicos de projetos de infraestrutura. Como estudo de caso, os autores analisaram dois cenários de construção de estradas no distrito de Peachland, British Columbia, Canadá. Os resultados indicaram que a proposta emergência-ACV fornece uma estrutura quantitativa abrangente para avaliar a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de sistemas rodoviários. No primeiro cenário (A), que é mais curto (1.150 m), os impactos incluem desmatamento significativo na fase de construção. Já o cenário B, mais longo (2.450 m), resulta maior consumo de recursos e emissões durante sua vida útil. Especificamente, o cenário B utiliza 95% mais recursos não renováveis e renováveis e gera 85% mais emissões, se comparado ao cenário A. O índice de carga ambiental (ELR) é 95% maior no cenário B, o que reflete o alto consumo de energia não renovável. A densidade de emergência por quilômetro é semelhante para ambos os cenários. Em geral, os pesquisadores afirmaram que, apesar de o cenário B preservar parte do ecossistema durante a construção, seus impactos cumulativos ao longo do ciclo de vida, devido ao maior uso de combustível e emissões, tornam o cenário A relativamente mais sustentável no longo prazo. Foi realizada ainda uma análise de sensibilidade de dados, como no aumento de tráfego ou vida útil do sistema, fato que confirma os resultados encontrados.

A partir da revisão de literatura apresentada, percebe-se que os pesquisadores usaram a síntese em emergência para realizar investigações no sistema de transporte; incluíram avaliações de infraestrutura, modais e logística, em relação a outros

métodos tradicionais disponíveis em literatura. Além disso, não foram encontrados artigos (pela base de dados da *Scopus*) que aplicaram a síntese em emergência como ferramenta principal no setor de transporte rodoviário para o Brasil. Sabe-se ainda que cada país possui suas particularidades que envolvem aspectos políticos, tecnológicos, ambientais, sociais e econômicos. Por isso, essa pesquisa de literatura sobre a emergência mostrou a necessidade de desenvolver avaliações regionais mais específicas para entender as variáveis locais nos sistemas de transporte.

3. PROPOSIÇÃO DE *FRAMEWORK* DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

A crescente demanda por sustentabilidade e a preocupação com os impactos ambientais, preconizadas na Agenda 2030 pela Organização das Nações Unidas (United Nations, 2024), têm evidenciado a necessidade de considerar essas dimensões nas intervenções logísticas que envolvem o uso de recursos ou geram potenciais cargas ambientais. Neste contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de um *framework* de avaliação que integre esses aspectos de forma abrangente, que contribua para decisões mais equilibradas e sustentáveis, especialmente no que se refere à implementação de sistemas de transporte.

Reconhecendo que os métodos de tomada de decisão para avaliar rotas logísticas de exportação baseiam-se tradicionalmente em custos econômicos e tempo de viagem, esta tese propõe um *framework* de otimização de rotas logísticas de exportação. O *framework* desenvolvido (Figura 1) permite comparar diferentes sistemas logísticos de transporte, avaliando a eficiência ambiental por meio de indicadores, como energia (escrita com 'm') e emissões de CO₂-eq., além das métricas normalmente utilizadas como custo e tempo de viagem.

Para a sua aplicação, deve-se inicialmente definir os objetivos de estudo para direcionar o levantamento de dados e a definição dos sistemas a ser avaliados. É importante destacar que o *framework* pode ser aplicado em sistemas unimodais e multimodais (rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo etc.), assim como em cenários reais ou simulados.

A partir do levantamento de dados, elabora-se um completo inventário que possibilita o cálculo dos indicadores e, conseqüentemente, a análise dos resultados. A avaliação dos resultados pode ser feita (i) individualmente: identificando os recursos que mais influenciam negativamente no resultado e sugerindo alternativas mais eficientes; e (ii) comparativamente, verificando as alternativas logísticas com menores impactos ambientais para energia e emissões de CO₂-eq., menores custos ou com viagens mais rápidas.

O *framework* inclui também uma abordagem multicritério para auxiliar na tomada de decisão sobre qual rota logística de exportação deveria ser priorizada. Portanto, pode-se sugerir a implementação do sistema logístico que alcançou os resultados mais positivos de acordo com a aplicação do *framework*.

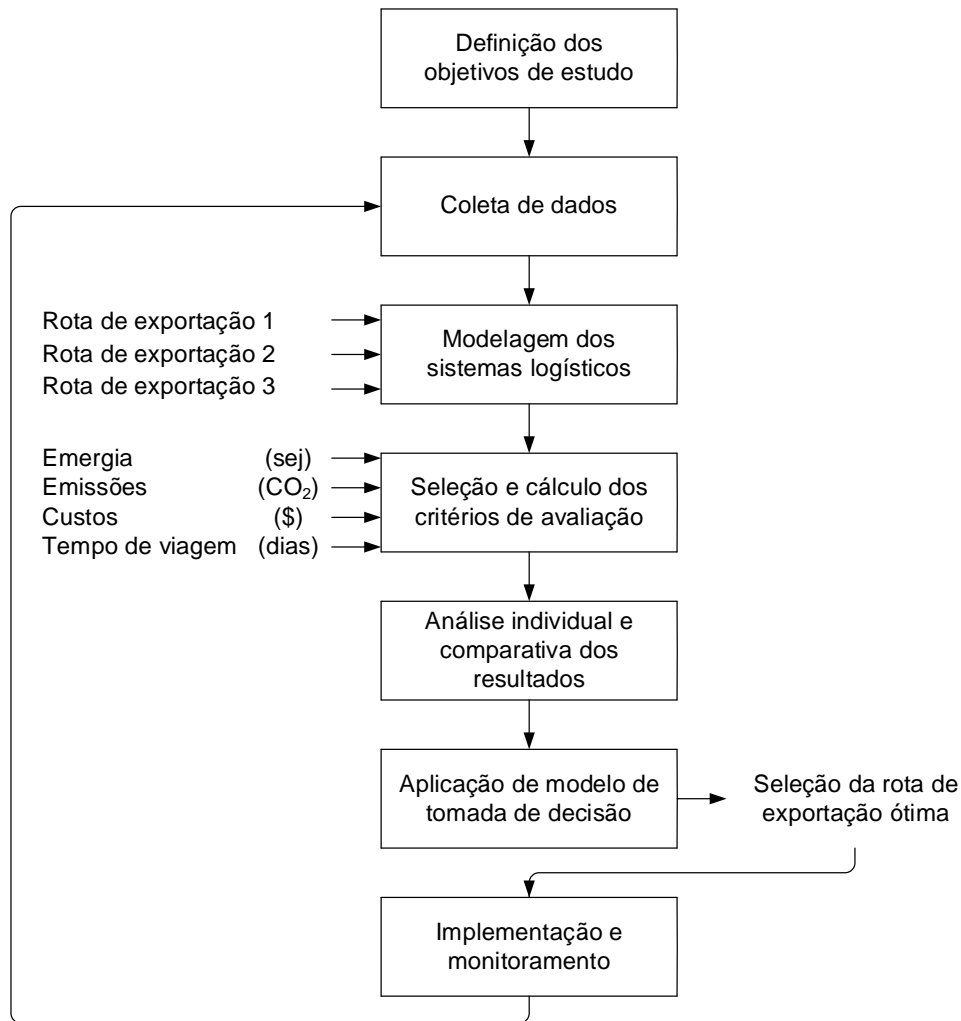


Figura 1. *Framework* proposto para a otimização de rotas logísticas de exportação.

De forma geral, avaliações podem ser divididas em duas categorias: as que focam sobre a quantidade de recursos utilizados pelos sistemas (conhecidos como métodos a montante), e as que focam nas consequências das emissões dos sistemas (chamados de métodos a jusante). O primeiro fornece dados sobre os custos ambientais indiretos, enquanto o segundo está próximo ao impacto imediatamente identificado sobre o ecossistema local. O *framework* proposto para a avaliação de sistemas logísticos fundamenta-se em quatro indicadores de desempenho: energia, custos, emissões de CO₂-eq. e tempo de viagem, o que abrange as consequências das emissões dos sistemas, como o uso de recursos necessários à sua implantação e à sua operação.

3.1. Aplicação do *framework* proposto

Para auxiliar no entendimento da aplicação do *framework*, avalia-se a possibilidade de uma nova rota para exportação de carne pelo Oceano Pacífico como alternativa estratégica que reduziria distâncias para o mercado asiático e ampliaria as opções logísticas para produtos do Centro-Sul do país.

3.1.1. Definição dos objetivos do estudo: avaliar três rotas de exportação de carne bovina partindo do Mato Grosso do Sul, Brasil, até Xangai, China

O estudo de caso considerado para a aplicação do *framework* considera uma avaliação dos indicadores energia, emissões de CO₂-eq., custo de operação e o tempo de viagem, para três rotas logísticas de exportação: incluindo os sistemas rodoviário e marítimo, de Campo Grande/MS até Xangai, China. Duas dessas rotas logísticas estão consolidadas e conectam-se à China pelos principais portos exportadores do Brasil: o Porto de Santos (SP) e o Porto de Paranaguá (PR). A terceira rota de exportação, que utiliza o Porto de Iquique, no Chile, e contempla modalidades de transporte rodoviário e marítimo, encontra-se em processo de implementação da malha rodoviária. Este avanço está sendo realizado em conformidade com os acordos estabelecidos entre Brasil, Argentina, Chile e Paraguai, no contexto do projeto de construção de uma rodovia voltada à integração regional. Essa nova rota rodoviária, conhecida como Rota Bioceânica, Corredor Bioceânico ou Rota de Capricórnio, foi planejada com o propósito de conectar a região centro oeste brasileira ao Oceano Pacífico e diminuir o tempo de transporte para a exportação de produtos até os países asiáticos, como a China. A Figura 2 mostra as fronteiras do sistema avaliado.

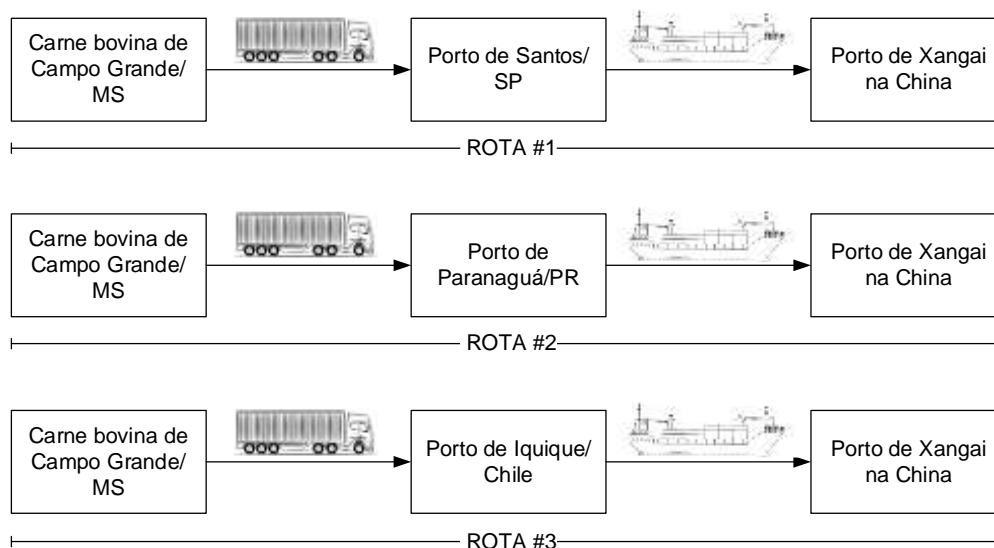


Figura 2. Rotas de exportação consideradas neste estudo.

Cabe destacar que diversas obras de infraestrutura relacionadas à rota de exportação 3 (malha rodoviária) estão em andamento, como a construção da ponte sobre o Rio Paraguai, que ligará Porto Murtinho (Brasil) a Carmelo Peralta (Paraguai), com conclusão prevista para 2026. Além disso, estão em curso (ou previstas) a pavimentação de aproximadamente 225 km no território paraguaio, a construção dos prédios alfandegários e a construção de uma alça de acesso à ponte, em Porto Murtinho-MS, com a extensão de 13,1 km. Essas obras são essenciais para o desenvolvimento desse corredor logístico, fato que reforça seu papel como um novo eixo de integração comercial entre os países signatários.

Ademais, a escolha da carne bovina como estudo de caso nesta tese se justifica pelo seu papel estratégico na economia brasileira e no comércio internacional. É o terceiro principal produto de exportação do estado de Mato Grosso do Sul, atrás apenas da soja e da celulose (SEMAGRO, 2024). Diferentemente, porém, desses produtos, a carne bovina apresenta características únicas de logística e comercialização, por ser um bem perecível e de alto valor agregado, o que demanda rigorosos controles de qualidade e eficiência ao longo de toda a cadeia de exportação. Como já exposto anteriormente, o Brasil se consolidou como um dos maiores exportadores globais de carne bovina, pois atende grandes mercados, como o da China (Hötzel e Vandresen, 2022). Apesar disso, é importante ressaltar que qualquer outro produto poderia ser utilizado como estudo de caso, já que o principal objetivo desta tese é propor um *framework* de avaliação de sistemas logísticos de transporte, e o estudo de caso é apresentado para validar esse *framework*.

3.1.2. Modelagem dos sistemas logísticos para elaboração do inventário

As rotas rodoviárias selecionadas foram numeradas de 1 a 3, e as duas primeiras estão totalmente em território brasileiro, enquanto a rota rodoviária 3 cruza quatro países com destino ao Porto de Iquique/Chile. Dado que a rota rodoviária 3 está em fase de implementação, alguns dos dados foram estimados com base no volume diário médio de transporte a partir do Mato Grosso do Sul e com base em simulações, usando-se *softwares*, como o 'QualP' (ferramenta para cálculo de viagens rodoviárias, <https://qualp.com.br/>). Informações mais detalhadas estão disponíveis no Apêndice H. A Figura 3 mostra as rotas rodoviárias avaliadas que compõem parcialmente o estudo de caso e estão nomeadas da seguinte maneira:

- a) rota rodoviária 1, Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP (1057,52 km);
- b) rota rodoviária 2, Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR (1096,44 km);
- c) rota rodoviária 3, Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile (2.465,04 km).



Figura 3. Rotas rodoviárias.

Com base nessa abordagem, foram realizadas análises detalhadas dos trajetos, utilizando-se imagens obtidas do Google Earth (2021; <https://earth.google.com/web/>) e do satélite Sentinel-2-L2A (2023; <https://collections.sentinel-hub.com/sentinel-2-l2a/>). Essas fontes de dados permitiram um mapeamento ajustado das rodovias; possibilitaram a identificação e o registro das características estruturais ao longo das rotas. A partir das imagens, foi possível determinar a localização exata de cada ponte, viaduto, trevo e túnel, além de medir a extensão e a largura dessas obras de infraestrutura (Apêndices B, C e D). Essa análise, além de aprimorar as medições, simplificou a avaliação da qualidade das rodovias e da capacidade de tráfego em cada trecho. O uso de dados atualizados

ofereceu uma visão detalhada das condições reais das vias e levou em conta as possíveis mudanças nas características físicas das rodovias desde a sua construção até o momento da análise.

As três rotas em estudo variam em extensão e número de faixas ao longo das regiões que atravessam no Brasil para as rotas 1 e 2, e nos quatro países analisados para a rota 3. No entanto, devido às semelhanças nos métodos de construção, foram utilizados os mesmos materiais e as mesmas proporções para a pavimentação em todas as rodovias, o que assegura uniformidade nos padrões de qualidade e de resistência do pavimento.

Em relação aos acostamentos, as dimensões variam conforme a localização e as normas regionais. Nas rodovias de Mato Grosso do Sul e Paraná, os acostamentos possuem 1 metro de largura em cada lado, enquanto as rodovias de São Paulo possuem 1,5 metro. Por outro lado, nas rodovias do Paraguai, Chile e Argentina, os acostamentos são mais amplos, medindo 2,5 metros de largura em cada lado. Essas variações foram determinadas com base em consultas a manuais técnicos e com a colaboração de engenheiros do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Agência Estadual de Gestão de Empreendimentos de Mato Grosso do Sul (Agesul-MS).

As pontes, os viadutos e os trevos ao longo dessas rotas também apresentam variações em suas larguras, que oscilam entre 10 e 40 metros, dependendo do número de faixas de rolamento. As pistas com 2 faixas exigem estruturas menores, enquanto as rodovias com 4 faixas demandam obras mais amplas e robustas. Esses dados foram confirmados através de análises de imagens de satélite obtidas pelo Sentinel-2-L2A, o que permite uma melhor verificação das dimensões das infraestruturas.

Outro ponto relevante refere-se aos trevos, que são utilizados para a conexão de rodovias. Quando o percurso utiliza uma alça de trevo que passa sobre uma rodovia, aplica-se o mesmo critério adotado para pontes e viadutos. O fato contabiliza a quantidade de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e a imprimação (camada de material asfáltico aplicada sobre uma superfície já compactada), utilizadas na pavimentação. Para facilitar o cálculo e o registro, os trevos foram classificados em dois tipos: térreos, que possuem alças ao nível da rodovia, e superiores, com alças elevadas sobre a rodovia. Essa categorização facilita a

representação da construção dessas interseções rodoviárias. Nos inventários, foram consideradas as dimensões dos trevos 'superiores' para efeito de cálculo.

Rota 1 - Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP

A rota 1, que liga Campo Grande/MS ao Porto de Santos/SP, possui um percurso total de 1.057,52 km. Embora não seja a mais longa das três rotas, destaca-se pela complexidade de sua infraestrutura. O trajeto abrange cerca de 340 km no estado de Mato Grosso do Sul e mais de 700 km em território paulista; ele cruza rodovias, como a Presidente Castelo Branco, a Raposo Tavares e a Anchieta. A combinação de trechos urbanos e rurais, juntamente com o elevado número de interseções e obras de arte especiais - estruturas como pontes, viadutos, túneis e trevos -, tornam essa rota um desafio estratégico e logístico para o transporte de mercadorias, especialmente rumo ao maior porto da América Latina: o Porto de Santos. A rota foi dividida em 8 trechos, o que considerou fatores, como a região, o tipo de rodovia (estadual ou federal), o número de faixas, assim como áreas urbanas e rurais ao longo do trajeto. Além disso, o inventário de dados da rodovia inclui registros detalhados das obras de infraestrutura que compõem a rota: 56 viadutos, 31 pontes e 64 trevos. Outro aspecto importante são os túneis ao longo do percurso, soluções técnicas fundamentais para atravessar terrenos irregulares e garantir maior fluidez ao trânsito (Apêndice B).

Rota 2 - Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR

A rota 2 percorre 1.096,44km, iniciando-se em Campo Grande/MS até o Porto de Paranaguá/PR. Esse trecho se estende na direção leste e atravessa grandes áreas de produção e escoamento de produtos no Brasil. O trajeto passa por uma parte do estado de São Paulo; utiliza a rodovia SP-613 e segue para o Paraná pela PR-182, antes de alcançar o destino, acessado pela BR-277. Este porto é um dos principais corredores logísticos do país, essencial para a exportação de produtos, especialmente do agronegócio, como soja, milho e carne bovina. A rota foi dividida em 7 trechos, de acordo com as mesmas observações apresentadas na rota 1. Ao longo do percurso, foram identificados e registrados 32 viadutos, 22 pontes e 11 trevos (Apêndice C).

Rota 3 - Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile

A rota 3 é a mais extensa entre as rotas analisadas, com um total de 2.465,04km. Partindo do mesmo ponto inicial das demais rotas, seu trajeto foi dividido em 19 trechos, e os seus seis primeiros estão localizados em território brasileiro. O percurso inicia-se pela BR-060 e segue pela BR-267, o que possibilita a conexão entre diferentes regiões. A entrada no Paraguai ocorrerá por meio da rodovia PY15, após cruzar a ponte binacional sobre o Rio Paraguai, obra de infraestrutura que ligará as cidades de Porto Murtinho (Brasil) e Carmelo Peralta (Paraguai). O destino da rota 3 é a cidade portuária de Iquique, no Chile, acessada pela Rota 16 (R-16). Iquique desempenha um papel relevante como ponto de exportação e importação no Oceano Pacífico; é importante elo para o comércio internacional da região. A rota passa por regiões de relevância econômica e geopolítica; conecta mercados e áreas produtivas. Além disso, o inventário rodoviário desta rota inclui 11 viadutos, 62 pontes e 43 trevos (Apêndice D).

3.1.2.1 Cálculo da infraestrutura das rodovias

A primeira etapa deste estudo tem como objetivo o cálculo dos materiais utilizados na construção das rodovias, em conformidade com as normas estabelecidas e as bases de dados do DNIT, conforme descrito no Manual de Pavimentação de 2006 e no da Agesul-MS (BRASIL, 2017a, 2017b). Para esses cálculos, foi adotada uma seção-tipo de pavimentação, que consiste em duas faixas de rolamento, cada uma com uma largura de 3,5 metros, o que totaliza uma seção de 1.000 metros de extensão (Apêndice E). No caso das pistas com três ou mais faixas de rolamento, as medidas correspondentes a cada faixa adicional serão acrescidas nos cálculos. Garante-se, assim, uma estimativa aproximada das quantidades de materiais necessários; busca-se sempre uma representação mais próxima da realidade e com aderência às normas técnicas de infraestruturas de rodovias.

Outra decisão importante foi restringir os cálculos aos materiais que compõem apenas as primeiras camadas da rodovia, conforme ilustrado na Figura 4. Essas camadas incluem (a) revestimento com CBUQ, que é utilizado sobre a rodovia para garantir a durabilidade e a resistência da superfície; (b) a capa-base, que proporciona suporte estrutural e resistência ao tráfego; (c) a capa sub-base, que atua como uma

camada intermediária, o que melhora a drenagem e a distribuição de carga; (d) a imprimação, que serve para promover a aderência entre as camadas e para melhorar a performance do pavimento.

Optou-se por não incluir, para efeito de inventário, os materiais utilizados nas camadas inferiores, como o subleito, o leito, a regularização, o reforço do subleito e o talude de aterro. Essa decisão foi tomada para se focar na análise das camadas que têm um impacto mais direto na performance da rodovia e nos custos associados ao seu revestimento e pavimentação. Essa abordagem permite uma avaliação mais detalhada e específica das primeiras camadas, que são essenciais para a operação e a manutenção eficazes das rodovias, o que facilita a identificação de possíveis melhorias e intervenções necessárias.

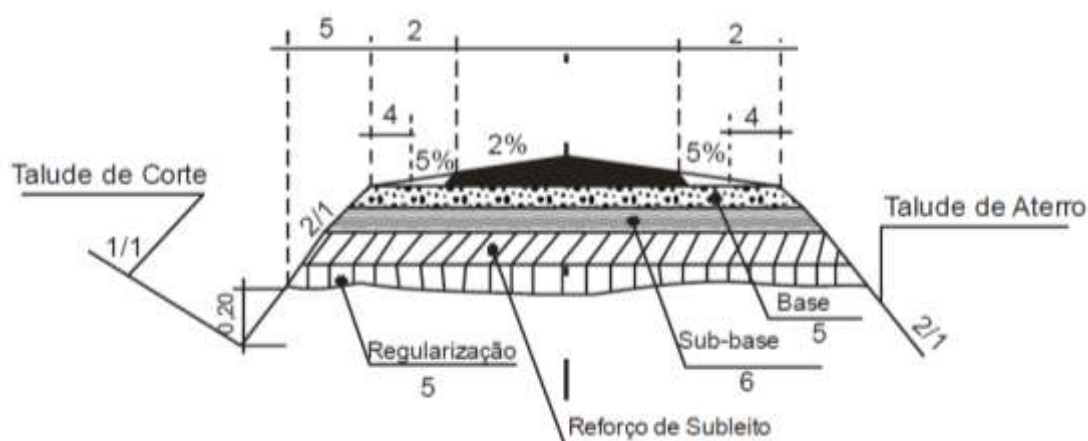


Figura 4. Esquema de sessão transversal do pavimento.

No inventário das pontes, viadutos, trevos e túneis, foram somados os valores referentes às camadas de CBUQ e à imprimação, uma vez que essas estruturas não requerem as camadas de capa-base e sub-base. Como já mencionado, a realização do inventário de dados da pavimentação foi pautada pelas normas estabelecidas pelo DNIT, que definem as composições e os percentuais dos materiais utilizados na construção de rodovias.

As equações 1 a 6 especificam os critérios utilizados para os cálculos dos materiais empregados na construção das rodovias, conforme orientações do manual do DNIT: (i) CBUQ (Eq. 1); (ii) imprimação (Eq. 2); (iii) capa-base (incluindo a capa sub-base, Eq. 3); (iv) acostamento (Eq. 4); e (v) estruturas, como pontes, viadutos e trevos (Eqs. 5 e 6). O inventário de dados detalhado está disponível no Apêndice G para a etapa de construção e no Apêndice H para a etapa de operação.

i. Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ

$$Nr \cdot b \cdot d \cdot l \cdot \rho = \text{massa de CBUQ} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Nr = número de faixas (de rolamento);

b = largura da faixa;

d = espessura da camada de CBUQ;

l = comprimento da seção-tipo;

ρ = densidade do CBUQ.

A equação 1 tem o resultado, em metro cúbico de CBUQ para cada seção-tipo de rodovia construída.

ii. Imprimação (ligação entre o CBUQ e a capa-base)

$$Nr \cdot b \cdot l \cdot \text{cob.} = \text{litros (CM-30)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

Nr = número de faixas (de rolamento);

b = largura da faixa;

l = comprimento da seção-tipo;

cob. = cobertura do CM-30.

iii. Capa-base e sub-base: constituída por cascalho e água

$$Nr \cdot b \cdot d \cdot l \cdot \rho = \text{massa de cascalho} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

Massa de cascalho x 7% = massa de água

Nr = número de faixas (de rolamento);

b = largura da faixa;

d = espessura da camada de capa-base (ou sub-base);

l = comprimento da seção-tipo;

ρ = densidade do cascalho.

iv. Acostamento

$$N_a \cdot b \cdot d \cdot l \cdot \rho = \text{massa de CBUQ} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

N_a = número de faixas (de acostamento);
 b = largura da faixa;
 d = espessura da camada de CBUQ;
 l = comprimento da seção-tipo;
 ρ = densidade do CBUQ.

v. Construção de pontes, viadutos e trevos (concreto e aço)

$$L \cdot B \cdot TC = \text{volume de concreto (em m}^3\text{)} \quad \text{Eq. 5}$$

$$L \cdot B \cdot TA = \text{quantidade de aço (em kg)} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

L = comprimento (ponte, ou viaduto, ou trevo);
 B = largura (ponte ou viaduto ou trevo);
 TC^a = taxa de concreto (m^3/m^2);
 TA^b = taxa de armadura (aço) (kg/m^2).

^a Taxa de concreto considerada: $1,395 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (m^3 de concreto por m^2 de ponte de concreto construída. Sendo a somatória dos valores de infraestrutura + mesoestrutura + superestrutura).

^b Taxa de armadura considerada: $146,481 \text{ kg}/\text{m}^2$ (kg de aço por m^2 de ponte de concreto construída. Sendo a somatória dos valores de infraestrutura + mesoestrutura + superestrutura).

O detalhamento dos materiais utilizados nas camadas calculadas encontra-se no Apêndice E, Tabela E2. Os valores foram organizados de acordo com o número de faixas de tráfego e as larguras dos acostamentos, o que facilita a consulta e a comparação entre as diferentes configurações de pavimentação. Esse método garante a conformidade com os padrões técnicos estabelecidos e oferece uma visão abrangente dos materiais necessários para a construção. A análise detalhada dos materiais utilizados nas primeiras camadas é essencial para aumentar a precisão do inventário, pois permite uma avaliação mais rigorosa e confiável dos recursos empregados.

3.1.2.2 Cálculo dos equipamentos, materiais e mão de obra para a fase de construção das rodovias

A segunda etapa do estudo concentra-se nos cálculos relacionados aos equipamentos (maquinários) utilizados na pavimentação das rodovias. Para garantir padronização, foi utilizado como referência o Caderno Técnico Parâmetros de Equipamentos do Sicro (Sistema de Custos Referenciais de Obras), versão 1.0, com mês de referência em abril de 2023. Esse documento técnico detalha os maquinários essenciais para a construção de rodovias, oferece uma descrição dos equipamentos, com suas respectivas classificações, códigos, potências e especificações técnicas (Apêndice F, Tabela F1).

O caderno apresenta ainda informações detalhadas sobre o consumo de combustível de cada tipo de equipamento, o que permite uma estimativa dos custos operacionais durante as fases de construção. Outro ponto abordado é a mão de obra necessária para operar cada tipo de máquina, o que inclui tanto operadores especializados, quanto o número de trabalhadores envolvidos no processo de construção. Com essas informações, foi possível quantificar os operários necessários e as horas de trabalho nas obras de pavimentação.

A seção-tipo foi utilizada como referência para o cálculo dos materiais, bem como para o dos equipamentos e da mão de obra necessários para a pavimentação rodoviária. Com base nessa seção-tipo, foram estimadas as horas operativas de cada equipamento e a função de trabalho, ou seja, o tempo necessário para a execução de cada tarefa com base na quantidade operativa.

As quantidades operativas foram determinadas através do Sistema SICRO, que fornece parâmetros padronizados para o cálculo de custos e tempos de execução em obras de infraestrutura. Os resultados foram validados por um engenheiro civil da Agesul-MS, garantia de conformidade técnica. O cálculo considerou uma seção de 1.000 metros de extensão para cada etapa da pavimentação, o que facilitou a projeção dos recursos ao longo de todo o percurso rodoviário (detalhes do cálculo e dos resultados estão disponível no Apêndice F, Tabela F2). Dessa forma, foi possível estimar o número de horas de trabalho de cada equipamento, desde escavadeiras e motoniveladoras até compactadores e usinas de asfalto; foi possível assegurar o planejamento adequado da mão de obra e dos materiais necessários para a execução do projeto.

3.1.2.3 Cálculo dos equipamentos, combustível e mão de obra para a fase de operação das rodovias

A operação logística contempla a movimentação da carga de carne bovina desde o ponto de origem, em Campo Grande (MS), até os portos brasileiros de Santos e Paranaguá, correspondente às rotas rodoviárias 1 e 2, respectivamente. Adicionalmente, inclui-se a simulação do transporte até o Porto de Iquique, no Chile, o que representa a rota rodoviária 3. Para o modal rodoviário, foram considerados três equipamentos principais: caminhão trator, semirreboque e contêiner refrigerado (chamado de *reefer*) de 40 pés, conforme especificado no Apêndice H, Tabela H1.

A estimativa da mão de obra necessária baseou-se na divisão da tonelage total de carne bovina por rota logística de exportação pela capacidade de carga de cada contêiner (22 toneladas), o que possibilitou determinar o número de viagens rodoviárias requeridas para o transporte da carga no ano de 2023. Considerando um motorista por veículo, definiu-se o total de caminhões e condutores para as rotas rodoviárias 1 e 2, além da projeção correspondente à rota rodoviária 3 (Apêndice H, Tabela H7).

3.1.2.4 Operação do sistema marítimo

Embora a maior parte da carne bovina brasileira exportada — especialmente aquela proveniente do estado de Mato Grosso do Sul — seja destinada a quatro grandes portos na China, para a aplicação do *framework* proposto nesta tese optou-se por considerar, especificamente, o Porto de Xangai. A escolha justifica-se por sua relevância logística: trata-se do maior porto da China e de um dos principais destinos da carne bovina brasileira, conforme o que se apresenta no Apêndice L, Tabela L2.

Para a elaboração do inventário de dados sobre a operação marítima, foram consideradas as informações obtidas de diferentes fontes, como www.theliquidgrid.com; www.ship-technology.com e www.onesteppower.com. Especificamente, obtiveram-se dados sobre as especificações dos navios utilizados para o transporte de carne bovina, como capacidade de carga (em quantidade de contêineres), operadores (mão de obra), tempo de viagem, custo de viagem, peso do navio, consumo de combustível etc. Essas informações são apresentadas no Apêndice K em detalhes e na Tabela 2 de forma resumida para cada rota.

A elaboração do inventário de dados concernentes à operação marítima considerou informações obtidas de distintas fontes, a saber: www.theliquidgrid.com; www.ship-technology.com; e, www.onesteppower.com. Esses dados abrangem as especificações dos navios para o transporte de carne bovina; incluem capacidade de carga (em número de contêineres), operadores (mão de obra), duração e custo das viagens, peso das embarcações e consumo de combustível.

É comum que o transporte anual de carne bovina ou produtos refrigerados envolva diversos navios que, em geral, operam com carregamentos mistos, ou seja, transportam outros itens além da carne. Neste ponto, é importante destacar que, embora a capacidade de carga de um navio ultrapasse os 14.000 contêineres de 20 pés, somente 500 contêineres refrigerados de 40 pés podem ser transportados. Isso representa aproximadamente 6,77%. Logo, os dados de peso de aço dos navios, a mão de obra, o diesel e os custos foram calculados proporcionalmente para cada viagem realizada. A partir disso, pode ser calculada a quantidade de insumos para a etapa de operação marítima. O procedimento de cálculo é apresentado no Apêndice K. A Figura 5 mostra as rotas marítimas avaliadas que compõem parcialmente o estudo de caso.



Figura 5. Representação das distâncias para o trecho marítimo das rotas logísticas de exportação. As rotas logísticas 1 e 2 traçam um percurso marítimo com destino à China, contornando o Cabo da Boa Esperança, na África do Sul. Essa escolha se baseia nas informações obtidas junto ao Porto de Paranaguá. A rota via Cabo da Boa Esperança é operada pelas embarcações de grande porte. O navio de referência para essas rotas é o Post-Panamax (Maersk) que tem sido utilizado pelos porta contêineres com destino à Ásia.

3.1.3. Coleta de dados: Inventário

Definidas as fronteiras dos sistemas avaliados, procede-se à elaboração de um inventário detalhado dos fluxos de entrada e saída, o que abrange recursos renováveis e não renováveis, economia e produtos do sistema, incluindo materiais, equipamentos e mão de obra necessários ao seu funcionamento. A Tabela 2 apresenta o inventário resumido de dados das três rotas de exportação de carne bovina, utilizadas como estudo de caso para validar o *framework* proposto. Os dados são apresentados, considerando-se a quantidade anual de equipamentos, os materiais e a mão de obra necessários para o funcionamento do sistema avaliado.

Tabela 2. Inventário-resumo das três rotas logísticas de exportação consideradas como estudo de caso para a validação do *framework* proposta.

Item ^a	Unidade	Quantidade de materiais, equipamentos e mão de obra								
		Rota 1			Rota 2			Rota 3		
		Total da rota ^b	unidade/ano ^c	unidade/km-ano ^d	Total da rota ^b	unidade/ano ^c	unidade/km-ano ^d	Total da rota ^b	unidade/ano ^c	unidade/km-ano ^d
Fase construção - sistema rodoviário										
Aço	kg	5.14E+07	2.74E+06	2.59E+03	9.52E+06	6.42E+05	5.85E+02	1.70E+07	1.25E+06	5.05E+02
Aço (pontes, viadutos e trevos)	kg	4.99E+07	2.50E+06	2.36E+03	7.99E+06	4.00E+05	3.64E+02	1.33E+07	6.65E+05	2.70E+02
Aço (equipamentos)	kg	1.53E+06	2.42E+05	2.29E+02	1.53E+06	2.42E+05	2.21E+02	3.68E+06	5.80E+05	2.35E+02
Concreto	m³	4.74E+05	2.37E+04	2.24E+01	7.61E+04	3.81E+03	3.47E+00	1.27E+05	6.35E+03	2.58E+00
Diesel	l	1.06E+07	5.30E+05	5.01E+02	9.32E+06	4.66E+05	4.25E+02	1.55E+07	7.75E+05	3.14E+02
Brita	ton	1.63E+06	8.15E+04	7.71E+01	1.43E+06	7.15E+04	6.52E+01	2.57E+06	1.29E+05	5.21E+01
Areia	ton	1.85E+05	9.25E+03	8.75E+00	1.62E+05	8.10E+03	7.39E+00	2.92E+05	1.46E+04	5.92E+00
Filler	ton	3.71E+04	1.86E+03	1.75E+00	3.25E+04	1.63E+03	1.48E+00	5.86E+04	2.93E+03	1.19E+00
Cimento	ton	1.03E+05	5.15E+03	4.87E+00	8.99E+04	4.50E+03	4.10E+00	1.62E+05	8.10E+03	3.29E+00
Cascalho	ton	9.39E+06	4.70E+05	4.44E+02	1.23E+07	6.15E+05	5.61E+02	1.27E+07	6.35E+05	2.58E+02
Água	ton	6.57E+05	3.29E+04	3.11E+01	8.63E+05	4.32E+04	3.94E+01	8.86E+05	4.43E+04	1.80E+01
CM-30	l	2.19E+07	1.10E+06	1.04E+03	1.88E+07	9.40E+05	8.57E+02	3.40E+07	1.70E+06	6.90E+02
Mão de obra	pessoas	1.10E+02	1.10E+02	1.04E-01	1.05E+02	1.05E+02	9.58E-02	2.81E+02	2.81E+02	1.14E-01
Fase de operação - sistema rodoviário										
Aço dos veículos	kg	-	2.09E+08	1.98E+05	-	5.90E+07	5.38E+04	-	1.56E+07	6.33E+03
Diesel	l	-	1.48E+07	1.40E+04	-	4.32E+06	3.94E+03	-	2.57E+06	1.04E+03
Mão de obra	pessoas	-	3.92E+04	3.71E+01	-	1.11E+04	1.01E+01	-	2.92E+03	1.18E+00
Fase de operação - sistema marítimo ^b										
Aço dos navios	kg	-	3.66E+07	1.79E+03	-	1.06E+07	5.17E+02	-	2.78E+06	1.51E+02
Diesel ^c	l	-	9.01E+07	4.40E+03	-	2.64E+07	1.28E+03	-	6.15E+06	3.34E+02
Mão de obra	pessoas	-	1.03E+03	5.02E-02	-	2.99E+02	1.45E-02	-	7.80E+01	4.24E-03

Dados detalhados nos Apêndices G e H.

^a O procedimento para cálculo dos equipamentos, materiais e mão de obra das fases de construção e operação são apresentados na seção 3.3;

^b Valor total de materiais, equipamentos etc., utilizado para a fase de construção das rotas rodoviárias;

^c Valor da fase de construção das rotas rodoviárias dividido pela vida útil das rodovias; para a operação rodoviária e marítima os valores estão na base anual;

^d Valor dos *inputs* utilizados anualmente para a fase de construção e de operação das rotas rodoviárias e divididos pela extensão das rodovias; para a operação marítima o valor anual foi dividido pela extensão do trecho marítimo.

A quantidade de carne transportada em cada rota de exportação (Tabela H9 do Apêndice H) foi estimada de acordo com o total de veículo pesados que foram utilizados para o transporte de carne no ano de 2023. Em média, um caminhão contêiner tem capacidade de transportar 22 toneladas de carne em um contêiner refrigerado. Para as rotas de exportação 1 e 2, foi possível obter a quantidade de veículos nos sistemas do DNIT para 2023 e foi necessário apenas multiplicar o número de veículos pela capacidade de carga. Já para a rota de exportação 3, em fase de implementação, houve uma estimativa, de acordo com a capacidade de tráfego da via, considerando-se os valores percentuais das rotas de exportação 1 e 2. Identificou-se a quantidade média de tráfego da rota 3 e, posteriormente, o valor encontrado foi multiplicado pela capacidade de carga de um caminhão contêiner. Detalhes do procedimento de simulação podem ser vistos na Tabela H7 do Apêndice H.

3.1.4. Seleção e cálculo dos critérios de avaliação: indicadores

A Figura 6 mostra a aplicação dos indicadores no sistema selecionado para exemplificar o uso do *framework* proposto.

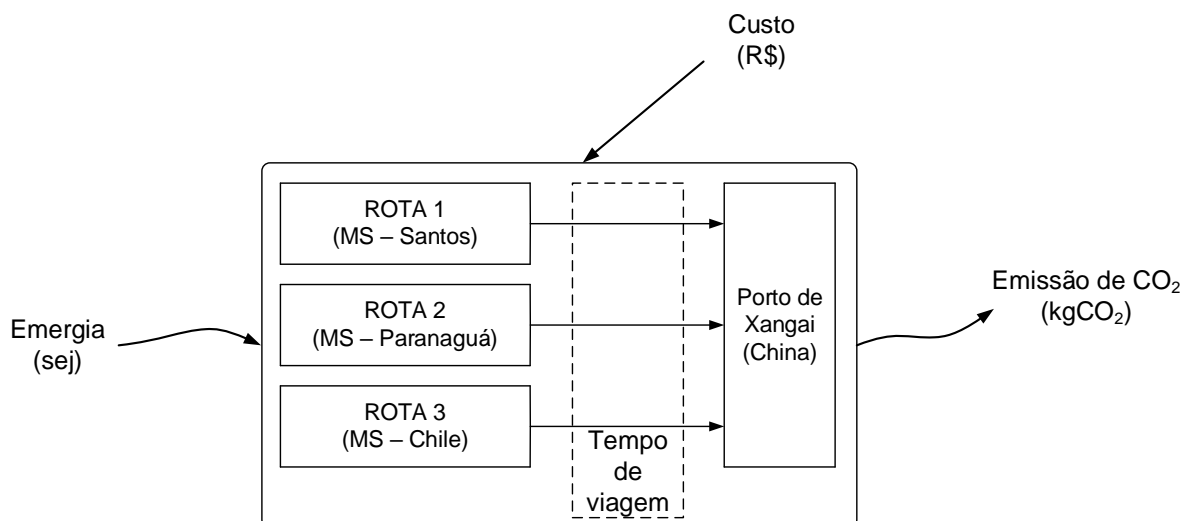


Figura 6. Indicadores de desempenho utilizados para avaliar rotas de exportação.

Os indicadores custos e emissões de CO₂-eq. são os mais utilizados em literatura científica para avaliar os aspectos econômicos e ambientais em sistemas logísticos (Huang *et al.*, 2018; Chen, Hu, Liu, 2024; Wang *et al.*, 2024). Além disso, decidiu-se considerar a energia, pois ela é um indicador com perspectiva sistêmica, ao considerar-se o lado do doador de recursos. A Tabela 3 mostra a denominação, a unidade e a descrição de cada indicador.

Tabela 3. Objetivos dos indicadores de desempenho utilizados para avaliar rotas de exportação.

Indicador	Unidade	Objetivo para esta tese
Energia investida ^a	sej/unidade	Avaliar a energia necessária por unidade (em massa) de produto transportado de Campo Grande/MS até o porto de Xangai.
Emissões de CO _{2eq.} ^b	kgCO _{2eq.} /unidade	Avaliar a quantidade de dióxido de carbono equivalente emitida por unidade (em massa) de produto transportado de Campo Grande/MS até o porto de Xangai.
Custo de operação ^c	R\$/unidade	Avaliar o custo econômico necessário por unidade (em massa) de produto transportado de Campo Grande/MS até o porto de Xangai.
Tempo de viagem	dia/unidade	Avaliar o tempo de viagem necessário (em dias) por unidade de produto transportado de Campo Grande/MS até o porto de Xangai.

^a detalhes em 3.1.4.1; ^b detalhes em 3.1.4.2; ^c detalhes em 3.1.4.3.

3.1.4.1 Energia investida

A síntese em energia foi introduzida para fornecer um método sistêmico e quantitativo para avaliar recursos, bens ou serviços em unidades comuns de energia solar e medida como *solar em joules* (sej). A abordagem tem se expandido em literatura para a avaliação de diversos sistemas. Porém, a revisão de literatura realizada mostrou que a energia não é amplamente usada em sistemas de transportes. Neste contexto, a aplicação da síntese em energia segue as etapas fundamentais, conforme sugerido por Odum (1996).

O ponto de partida da análise é a construção do diagrama de energia dos sistemas avaliados, o que representa graficamente os fluxos de energia que ocorrem em suas diferentes etapas. O diagrama foi elaborado, seguindo-se as diretrizes propostas por Odum (1996); incluíram-se os principais elementos do sistema: fontes de entrada, processos internos e saídas. Sua construção é essencial para identificar as interdependências entre os componentes das rodovias e para delimitar os limites do sistema ou fronteiras do estudo. O diagrama de energia é elaborado com a utilização de símbolos específicos, disponíveis na Tabela J1 do Apêndice J.

Na sequência, por meio do inventário dos recursos necessários para o funcionamento dos sistemas rodoviários avaliados (Tabela 2), cada recurso utilizado pelo sistema é convertido para a unidade de energia por meio da "transformidade", ou UEV (*unit emergy value* ou valor unitário em energia), que representa a quantidade de energia solar necessária para gerar uma unidade de energia, matéria, serviços, dinheiro etc., medida em sej/unidade (sej/J, sej/g, sej/R\$ e assim por diante). Esse

método utiliza uma unidade de medida padronizada para todos os recursos e, segundo Amaral, Martins e Gouveia (2016), possibilita comparações mais equilibradas entre diferentes sistemas.

As UEVs são coletadas de literatura científica dos mais diferentes níveis e na seguinte ordem de preferência: artigos internacionais, artigos nacionais, teses de doutorado, dissertações de mestrado e relatórios governamentais. Destacam-se ainda as bases de dados da *National Environmental Accounting Database V2.0* (<http://www.emergy-nead.com/home>) e da *United States Environmental Protection Agency* (<https://www.epa.gov/water-research/uev-library#access>). Metodologicamente, a padronização das UEVs, utilizadas para a baseline de energia, é fundamental. Neste estudo, adota-se a baseline de $12,00E+24$ sej/ano (Brown *et al.*, 2016). Em termos fundamentais, a baseline é uma estimativa do fluxo anual de energia solar que sustenta os processos naturais e humanos na Terra.

3.1.4.2 Emissões de CO₂-eq.

Para calcular as emissões de CO₂-eq., utilizam-se a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e o indicador ou categoria de impacto Potencial de Aquecimento Global, expressando os resultados em kgCO₂-eq./unidade. A ACV é regida por normas internacionais estabelecidas pela Organização Internacional de Normalização (ISO), especificamente as normas ISO 14040 e ISO 14044 de 2006 (ISO, 2006a; 2006b). A ISO 14040 descreve os princípios e a estrutura da ACV; a ISO 14044 fornece requisitos e diretrizes detalhados para a realização da análise.

De acordo com a ISO (2006a), a ACV é uma “compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”. Essa metodologia é usada para avaliar os impactos ambientais de um produto, o processo ou o serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida; para isto, fornece uma visão abrangente e detalhada dos impactos ambientais.

Nesta tese, definiu-se como unidade funcional 1 quilômetro-tonelada de carne bovina transportada do Mato Grosso do Sul até o porto de Xangai na China (1 km-ton. carne na China). Já o escopo deste estudo inclui três rotas de exportação a partir do Mato Grosso do Sul no Brasil até os quatro principais portos da China (sistemas

rodoviários e marítimos), para o período de 1 ano de operação, tendo como base o ano de 2023.

Após a elaboração do inventário, os dados coletados são transformados em indicadores de impacto ambiental. Esta fase envolve a classificação dos dados de inventário em categorias de impacto, como o potencial de aquecimento global que será usado neste estudo. Cada fluxo de entrada e saída é associado a uma categoria de impacto específica, e os impactos potenciais são quantificados, utilizando-se fatores de caracterização. A escolha da metodologia apropriada depende do objetivo e do escopo do estudo. O banco de dados (Ecoinvent (<https://www.ecoinvent.org/login-databases.html>), versão 3.8 de 2021, “Allocation, cut-off by classification”) é visto como fonte de dados para os fatores de conversão, utilizados na ACV, considerando-se o método “Recipe Midpoint (H) V1.13”. O Apêndice I mostra os fatores de caracterização para o cálculo das emissões diretas e indiretas. É importante destacar que o indicador ou a categoria de impacto ‘potencial de aquecimento global’ é o mais utilizado em estudos de impactos ambientais que envolvem sistemas de transporte (Mouette *et al.*, 2019; Gohari *et al.*, 2022; Ribeiro, Do Nascimento e Da Silva, 2022), já que ele é responsável por indicar a quantidade (em massa) de CO₂-eq. emitida na atmosfera por um sistema, processo ou produto.

3.1.4.3 Custos econômicos operacionais

Os custos financeiros desempenham um papel preponderante na tomada de decisões estratégicas e operacionais relacionadas à implementação de qualquer sistema logístico. A análise de custos operacionais permite identificar ineficiências, otimizar recursos e aumentar a competitividade em mercados cada vez mais exigentes. Estudos sobre custos logísticos englobam aspectos, como transporte, armazenagem, distribuição e gestão de estoques, todos diretamente relacionados à rentabilidade das operações (Ballou, 2006; Grant, 2013). Apesar de a necessidade de incorporar impactos ambientais e sociais em políticas públicas seja cada vez mais discutida, os custos econômicos continuam sendo fatores determinantes para decisões governamentais e empresariais. Nesse contexto, ferramentas de avaliação tornam-se essenciais e, nesta tese, os custos operacionais são tratados como uma variável crítica para a análise de sistemas logísticos.

Foram calculados os custos de operação de três alternativas logísticas de transporte, com destaque para despesas relacionadas ao consumo de combustível e de pedágios (Tabela H6 do Apêndice H). Para os custos operacionais dos caminhões, foram utilizados relatórios técnicos de consumo veicular obtidos por meio de contatos com empresas de transportes rodoviários e dados do fabricante de caminhão - modelo utilizado como referência (Scania R-450). No caso do sistema marítimo, os dados foram obtidos por meio de simulações realizadas em *softwares* especializados, como o <https://sea-distances.org/>. A aplicação de um indicador financeiro já consolidado em políticas públicas possibilita integrar a análise econômica aos aspectos ambientais avaliados no *framework* proposto, o que permite uma abordagem sistêmica para a escolha de alternativas logísticas mais sustentáveis e eficientes. O indicador 'custo de operação' mostra quanto (em reais) é necessário para se transportar um produto em cada sistema de transporte avaliado.

Os custos portuários não foram considerados nesta análise. De acordo com os Incoterms® 2020 (*International Commercial Terms*), a exportação de carne bovina opera, via de regra, sob o regime FOB (*Free on Board*). Considerando-se a complexidade operacional, a diversidade de atores envolvidos no processo e a variabilidade das taxas portuárias entre os diferentes portos, optou-se por não incluir esses valores. No regime FOB, as despesas até a entrega da mercadoria a bordo do navio são de responsabilidade do vendedor.

3.1.4.4 Tempo de viagem

O tempo total de viagem foi estimado, considerando-se como ponto de origem a cidade de Campo Grande (MS) e, como destino final, o Porto de Xangai, na China, para todas as rotas avaliadas. Os dados referentes às rotas logísticas de exportação 1 e 2 (trecho rodoviário) foram obtidos por meio da ferramenta <https://qualp.com.br>, que realiza os cálculos com base nas características das vias e do veículo. No caso da rota logística de exportação 3, como o percurso ainda não está em operação, foi adotado um valor estimado por quilômetro, com base em parâmetros semelhantes aos utilizados nas demais rotas. Todas as simulações rodoviárias consideraram o uso de um caminhão Scania R-450, porta contêiner, como padrão.

Para o trecho marítimo, utilizou-se a ferramenta <https://sea-distances.org/>, a partir das localizações reais dos portos de embarque de cada rota. Assim como no

modal terrestre, adotou-se um modelo de navio de referência: o Emma Maersk (2006), do tipo porta contêiner e classe Post-Panamax.

3.1.5 Aplicação do modelo de tomada de decisão

Para a tomada de decisão, considerou-se o Método de agregação aditivo determinístico proposto por Almeida (2013). Segundo o autor, problemas de decisão multicritério envolvem uma situação em que existem ao menos duas alternativas de ação para se escolher. A escolha será feita mediante o desejo de se alcançar múltiplos objetivos que, quase sempre, são conflitantes entre si. Associados a esses objetivos, existem critérios que representam as alternativas do problema avaliado. Nesse modelo (Almeida; Seleme; Cardoso-Neto, 2013), há uma situação de certeza na obtenção do vetor de consequências x para cada alternativa a . Portanto, se utiliza para a avaliação intracritério a função valor $v_j(a)$, que fornece a avaliação de cada alternativa a_i para cada critério j . Para a obtenção da função valor global $v(a)$, tem-se

$$v(a) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(a) \quad \text{Eq. 1}$$

em que k_j representa a constante de escala para o critério j e é normalizado, conforme segue:

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1 \quad \text{Eq. 2}$$

A solução de um problema no contexto de escolha consiste na seleção da alternativa que tenha o máximo valor global $v(a)$.

De forma geral, essa matriz possibilita a análise comparativa de múltiplos critérios; para isto, ela considera diferentes níveis de importância (pesos), atribuídos a cada critério (indicador). Para esta tese, os critérios selecionados para a análise foram aqueles que impactaram diretamente o desempenho e a eficiência das rotas de exportação. Seus quatro indicadores são energia, emissões de $\text{CO}_2\text{-eq.}$, custo de operação e o tempo de viagem de cada rota de exportação (de Campo Grande/MS até Xangai, China). Entende-se que este último aspecto é essencial para esta análise

multicritério, já que as decisões sobre implementar uma terceira rota de exportação pelo Chile foi baseada exclusivamente no tempo de viagem até a China. Cada critério foi ponderado de acordo com sua importância relativa para o objetivo final, totalizando 1 (100%). Por exemplo: critério 'm': 0,25; critério 'n': 0,25; critério 'p': 0,25; critério 'q': 0,25. Os pesos foram definidos pelo autor desta tese que considerou sua expertise na área de logística e sua experiência em sustentabilidade, adquirida durante o período de doutoramento.

É importante ressaltar que a função valor neste trabalho é do tipo que se deseja minimizar. Logo, os valores foram transformados, usando $v'_j(a_i) = 1 / v_j(a_i)$, mantendo cardinalidade para uma escala de razão. Além disso, as rotas de exportação foram normalizadas pelo método mín./máx. (Equação 3), o que resultou em valores no intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$:

$$v'_j(a_i) = [v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)] / [\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)] \quad \text{Eq. 3}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aplicação do *framework* em rotas logísticas de exportação

O *framework* proposto nesta tese é aplicado, nesta seção, em três rotas logísticas de exportação que partem do estado de Mato Grosso do Sul, no Brasil, com destino a Xangai, na China. Inicialmente, as três rotas são analisadas sem se levar em conta um produto específico. Esse método permite uma avaliação mais ampla e estratégica; garante que, ao concluir essa etapa, qualquer produto que possa ser exportado seja facilmente inserido na análise.

4.1.1 Diagrama de energia

O *framework* proposto para a otimização de rotas logísticas de exportação inicia-se com a definição dos objetivos do estudo e a subsequente coleta de dados relevantes. Em seguida, modelam-se os sistemas analisados, etapa fundamental para a compreensão do funcionamento e das inter-relações entre os componentes logísticos. Para subsidiar essa etapa, elaborou-se um diagrama de energia sintético, com o propósito de representar os limites e fluxos associados às rotas logísticas de exportação. Embora apresente uma visão geral, esse diagrama pode ser aprofundado conforme a complexidade e os requisitos específicos de cada estudo.

O diagrama de energia tem como premissa representar de forma clara e detalhada os fluxos de massa e energia que ocorrem em um sistema, o que evidencia suas interações em uma fronteira previamente estabelecida. Essa representação gráfica permite visualizar como os diferentes processos se conectam e se integram ao longo do sistema, o que facilita a análise dos recursos consumidos, transformados e gerados. A Figura 7 apresenta o diagrama de energia, utilizado para mapear as diferentes entradas de recursos – renováveis (R), não renováveis (N) e da economia (F) – necessárias para o cálculo proposto.

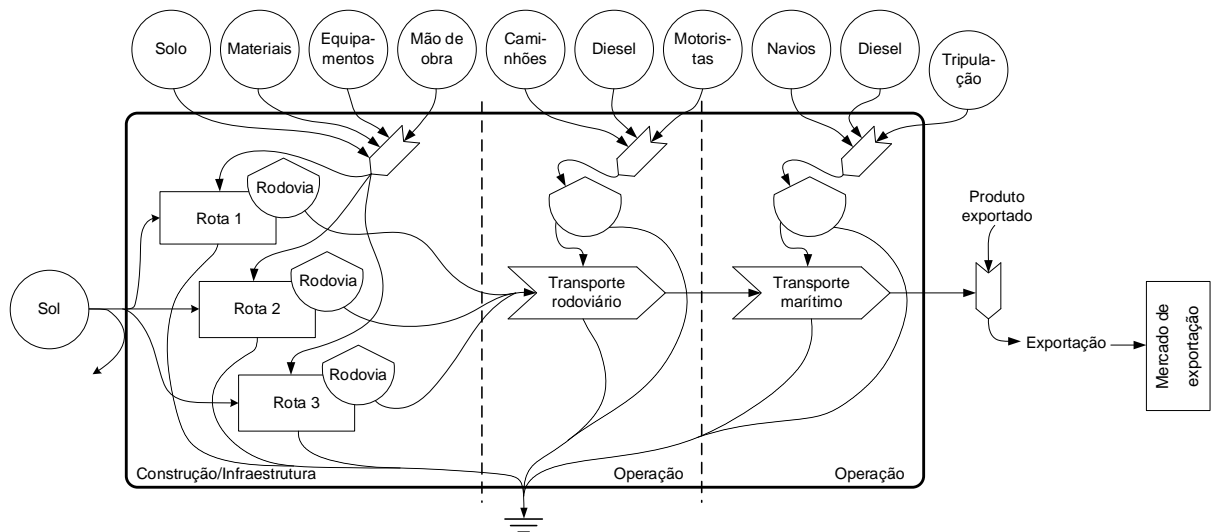


Figura 7. Diagrama de energia de rotas logísticas de exportação.

O traçado no diagrama reflete a dinâmica entre os recursos utilizados na construção, na operação e na manutenção dessas rotas. Na parte esquerda do diagrama, referente à construção e à infraestrutura, estão representados os fluxos de entrada que incluem o solo ocupado, os materiais de pavimentação, os equipamentos de construção e a mão de obra, fatores essenciais para a implementação física das rodovias. A parte direita do diagrama representa a operação do sistema, com entradas que incluem os caminhões e os navios utilizados no transporte de cargas e os motoristas e a tripulação responsáveis pela condução desses veículos. Essa divisão tem o objetivo de apresentar visualmente as partes (duas) que compõem o sistema. É importante ressaltar que ambas possuem a mesma relevância; são indispensáveis para a avaliação e a comparação dos sistemas em análise.

4.1.2 Análise dos indicadores

De acordo com o *framework* proposto, após a modelagem dos sistemas estudados, podem-se calcular os indicadores de desempenho para as rotas logísticas de exportação. Os cálculos dos quatro indicadores são apresentados a seguir.

4.1.2.1 Indicador eMergia

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam o procedimento de cálculo e os resultados da aplicação da síntese em energia (escrita com ‘m’) para as três rotas logísticas de exportação avaliadas. Segundo Odum (1996), energia é “a energia total necessária,

de forma direta ou indireta, para gerar um bem ou um produto”, medida em sej/unidade. Conforme estabelecido no *framework* proposto, o foco da análise está restrito à quantificação da emergia total investida.

A fim de realizar uma análise detalhada da emergia investida, as fases de construção e de operação foram discriminadas, e isto permite a identificação do ponto de maior consumo de recursos ambientais, ou seja, maior investimento em emergia. Nas últimas colunas das Tabelas 4, 5 e 6, é possível observar a participação percentual de cada fluxo de entrada na construção e na operação das rotas de exportação. Esses dados são fundamentais para orientar a tomada de decisões; eles permitem a implementação de ações direcionadas. O *framework* proposto visa a avaliar somente os dados biofísicos do sistema. As UEVs utilizadas no cálculo da emergia não consideram serviços que não foram incluídos na contabilidade. A decisão foi baseada no cálculo dos ‘serviços’, pois o cálculo utiliza a EMR dos países onde os serviços são ofertados, o que causa variações no indicador.

A Tabela 4 apresenta a aplicação da síntese em emergia para as etapas de construção e de operação (rodoviária e marítima) da rota logística de exportação 1, que se inicia em Campo Grande/MS e tem como destino o Porto de Xangai (China), via Porto de Santos/SP. Os resultados indicaram um investimento total em emergia de $6,70\text{E}+17$ sej/km-ano, e este total se divide em etapa de construção da rodovia responsável por 26,13% ($1,75\text{E}+17$ sej/km-ano), em operação rodoviária por 69,98% ($4,69\text{E}+17$ sej/km-ano) e em operação marítima por 3,89% ($2,60\text{E}+16$ sej/km-ano). Vê-se, portanto, que a etapa de operação rodoviária representou a maior contribuição para o indicador emergia da rota logística de exportação 1.

Tabela 4. Cálculo da energia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 1.

Item	Quantidade ¹	Unidade/km-ano	UEV ²	Unidade	Energia (seJ/km-ano)	% parcial	% total
Fase construção - sistema rodoviário							
Aço	2.59E+03	kg	2.01E+12	sej/kg	5.20E+15	2.97	0.78
Aço (pontes, viadutos e trevos)	2.36E+03	kg	2.01E+12	sej/kg	4.74E+15		
Aço (equipamentos)	2.29E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	4.60E+14		
Concreto	2.24E+01	m³	4.39E+15	sej/m³	9.84E+16	56.21	14.69
Diesel	5.01E+02	l	5.10E+12	sej/l	2.56E+15	1.46	0.38
Brita	7.71E+01	ton	1.27E+14	sej/ton	9.79E+15	5.59	1.46
Areia	8.75E+00	ton	1.42E+14	sej/ton	1.24E+15	0.71	0.19
Filler	1.75E+00	ton	1.27E+14	sej/ton	2.23E+14	0.13	0.03
Cimento	4.87E+00	ton	2.50E+14	sej/ton	1.22E+15	0.70	0.18
Cascalho	4.44E+02	ton	1.27E+14	sej/ton	5.64E+16	32.22	8.42
Água	3.11E+01	ton	7.29E+11	sej/ton	2.26E+13	0.01	0.00
CM-30	1.04E+03	l	4.41E+08	sej/l	4.57E+11	0.00	0.00
Mão de obra	1.04E-01	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	1.60E+06	0.00	0.00
Energia total investida na construção da rodovia (CR)					1.75E+17	100.00	26.13
Fase de operação - sistema rodoviário							
Aço dos veículos	1.98E+05	kg	2.01E+12	sej/kg	3.97E+17	84.76	59.32
Diesel	1.40E+04	l	5.10E+12	sej/l	7.14E+16	15.24	10.66
Mão de obra	3.71E+01	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	5.71E+08	0.00	0.00
Energia total investida na operação da rodovia (OR)					4.69E+17	100.00	69.98
Fase de operação - sistema marítimo							
Aço dos navios	1.79E+03	kg	2.01E+12	sej/kg	3.59E+15	13.79	0.54
Diesel	4.40E+03	l	5.10E+12	sej/l	2.25E+16	86.21	3.35
Mão de obra	5.02E-02	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	7.72E+05	0.00	0.00
Energia total investida na operação marítima (OM)					2.60E+16	100.00	3.89
Investimento em energia (CR+OR+OM)					6.70E+17		100.00

¹ Os dados estão disponíveis na Tabela 2.

² As UEVs estão na *Earth Baseline* atual (12.00E+24 sej/ano); detalhes disponíveis no Apêndice A.

Para uma análise mais detalhada, torna-se relevante identificar qual insumo exerce maior influência sobre esse resultado. Essa análise permite direcionar políticas públicas mais eficazes na mitigação dos impactos associados ao uso de recursos naturais. No caso analisado, o aço utilizado na fabricação dos veículos e contêineres destacou-se como o principal insumo responsável por essa pressão ambiental. Ele representa 84,76% do impacto da etapa de operação rodoviária e 59,32% da demanda de energia total da rota logística de exportação 1. Logo, torna-se essencial buscar alternativas ambientalmente mais sustentáveis relacionadas à produção e ao uso do aço, tais como o incentivo à reciclagem, a adoção de tecnologias de baixo carbono na siderurgia, o desenvolvimento de materiais substitutos de menor intensidade em energia (menor UEV) e a renovação de frotas com veículos mais leves e mais eficientes.

Destaca-se ainda o uso do concreto na etapa de construção da rodovia, o qual representou a segunda maior contribuição em energia investida na rota logística de

exportação 1, com 14,69%. Esse insumo também exerceu o principal impacto na etapa de construção; respondeu por 56,21% da energia demandada nessa fase.

Comparativamente às rotas logísticas 2 e 3 (Tabelas 5 e 6), a rota logística 1 possui proporcionalmente um maior número de obras de artes especiais (pontes, viadutos e trevos). Ela demanda, conseqüentemente, uma maior quantidade de concreto. Diante disso, políticas públicas e estratégias de engenharia poderiam concentrar esforços na otimização do uso de concreto, seja pela incorporação de materiais alternativos, seja pelo incentivo ao uso de tecnologias construtivas mais eficientes e duráveis, que reduzam a necessidade de intervenções futuras.

O consumo de combustível (diesel) durante a etapa de operação rodoviária representou o terceiro maior efeito na energia total investida, correspondendo a 10,98%. Nesse contexto, recomenda-se priorizar ações voltadas à eficiência energética do transporte rodoviário, como a adoção de veículos com menor consumo específico de combustível, o uso de biocombustíveis de segunda geração ou a eletrificação progressiva da frota. Tais medidas podem contribuir para a diminuição da dependência de recursos fósseis e para a transição para um modelo logístico ambientalmente mais sustentável.

Da mesma forma, o combustível usado nos navios foi o insumo de maior efeito na etapa de operação marítima. Representou 86,21% da energia investida nessa fase e ocupou a quarta posição na contribuição para a energia total da rota logística 1, com 3,35%. Ainda em relação à operação marítima, observa-se que sua participação no investimento total em energia foi de 3,89%. Esse valor, relativamente reduzido, quando comparado às demais etapas, pode ser explicado pela elevada eficiência do transporte marítimo que, apesar do seu longo percurso, requer um número reduzido de embarcações em função de sua alta capacidade de carga.

A Tabela 5 mostra o resultado do indicador energia para a rota logística de exportação 2, que liga Campo Grande/MS ao Porto de Xangai/China, via Porto de Paranaguá/PR. De forma geral, os resultados indicaram um investimento total em energia de $2,36\text{E}+17$ sej/km-ano. A etapa de construção da rodovia é responsável por 42,5% ($1,00\text{E}+17$ sej/km-ano); a operação rodoviária, por 54,3% ($1,28\text{E}+17$ sej/km-ano); a operação marítima, por 3,2% ($7,57\text{E}+15$ sej/km-ano). Assim como na rota logística de exportação 1, a alternativa logística 2 apresentou um maior investimento em energia para a etapa de operação rodoviária em relação às fases de construção rodoviária e operação marítima.

Tabela 5. Cálculo da energia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 2.

Item	Quantidade ¹	Unidade/km-ano	UEV ²	Unidade	Energia (seJ/km-ano)	% parcial	% total
Fase construção - sistema rodoviário							
Aço	5.85E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	1.18E+15	1.17	0.50
Aço (pontes, viadutos e trevos)	3.64E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	7.32E+14		
Aço (equipamentos)	2.21E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	4.44E+14		
Concreto	3.47E+00	m³	4.39E+15	sej/m³	1.52E+16	15.18	6.45
Diesel	4.25E+02	l	5.10E+12	sej/l	2.17E+15	2.16	0.92
Brita	6.52E+01	ton	1.27E+14	sej/ton	8.28E+15	8.25	3.51
Areia	7.39E+00	ton	1.42E+14	sej/ton	1.05E+15	1.04	0.44
Filler	1.48E+00	ton	1.27E+14	sej/ton	1.88E+14	0.19	0.08
Cimento	4.10E+00	ton	2.50E+14	sej/ton	1.02E+15	1.02	0.43
Cascalho	5.61E+02	ton	1.27E+14	sej/ton	7.12E+16	70.96	30.16
Água	3.94E+01	ton	7.29E+11	sej/ton	2.87E+13	0.03	0.01
CM-30	8.57E+02	l	4.41E+08	sej/l	3.78E+11	0.00	0.00
Mão de obra	9.58E-02	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	1.47E+06	0.00	0.00
Energia total investida na construção da rodovia (CR)					1.00E+17	100.00	42.50
Fase de operação - sistema rodoviário							
Aço dos veículos	5.38E+04	kg	2.01E+12	sej/kg	1.08E+17	84.33	45.79
Diesel	3.94E+03	l	5.10E+12	sej/l	2.01E+16	15.67	8.51
Mão de obra	1.01E+01	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	1.56E+08	0.00	0.00
Energia total investida na operação da rodovia (OR)					1.28E+17	100.00	54.30
Fase de operação - sistema marítimo							
Aço dos navios	5.17E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	1.04E+15	13.73	0.44
Diesel	1.28E+03	l	5.10E+12	sej/l	6.53E+15	86.27	2.77
Mão de obra	1.45E-02	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	2.24E+05	0.00	0.00
Energia total investida na operação marítima (OM)					7.57E+15	100.00	3.20
Investimento em energia (CR+OR+OM)					2.36E+17		100.00

¹ Os dados estão disponíveis na Tabela 2.

² As UEVs estão na *Earth Baseline* atual (12.00E+24 sej/ano); detalhes disponíveis no Apêndice A.

De forma mais detalhada, os resultados para a fase de construção mostram que os materiais de base para a infraestrutura física (agregados, como cascalho, brita e concreto) dominam a demanda por energia desta fase; representam mais de 40% dos 42,5% totais. Embora o aço esteja presente em várias aplicações, sua contribuição individual é menor, se comparada aos agregados minerais. Outro ponto relevante é a baixa contribuição da mão de obra (0,00%), o que pode ser explicado tanto pelo valor relativamente baixo do UEV associado, quanto pela pequena quantidade considerada por km-ano.

Já em relação à fase de operação rodoviária, observa-se uma forte dependência de veículos automotores e combustíveis fósseis, o que reforça o uso de fontes de energia não-renováveis desse modo de transporte ao longo do tempo. Especificamente, o aço dos veículos corresponde a 45,79%; o consumo de diesel, a 8,51% da energia total da rota logística de exportação 2.

O transporte marítimo revela que, mesmo com participação reduzida no total investido, o sistema apresenta maior eficiência energética relativa, especialmente quando se considera sua menor demanda por materiais e mão de obra por km-ano. O consumo de combustível nos navios (86,27%) foi o fator que mais contribuiu para a energia investida na etapa de operação marítima.

Por fim, pode-se afirmar que o sistema rodoviário exige um maior investimento em energia, pois representa 96,8% do total ($CR + OR = 2,28E+17$ sej/km-ano). Já o sistema marítimo, embora menos representado, requer menos energia para operar, o que o torna uma alternativa mais sustentável do ponto de vista ambiental, principalmente para longas distâncias e grandes volumes de carga.

Para reduzir o impacto do indicador energia para a rota logística de exportação 2 no curto prazo, é essencial substituir o diesel por biocombustíveis, otimizar o uso de agregados minerais com planejamento e aproveitar resíduos da construção civil, incentivar veículos mais leves e eficientes e priorizar o modal marítimo quando possível. No longo prazo, recomenda-se investir em frotas elétricas ou a hidrogênio, desenvolver materiais alternativos com menor intensidade em energia e incorporar o uso de abordagens ambientais em políticas públicas e processos de licenciamento.

Embora as três rotas logísticas de exportação tenham origem em Campo Grande/MS, a rota logística de exportação 3 é a única que se direciona para oeste, ao Porto de Iquique/Chile e, em seguida, à Ásia. É importante salientar que o sistema logístico 3 está em fase de implementação e foi incentivado devido à redução no tempo de transporte até países asiáticos. Porém, não se sabe sobre seu impacto ambiental em termos de energia. A etapa de construção rodoviária da rota 3 possui elevada complexidade e longa extensão, pois liga quatro países e exige obras que requerem grandes esforços construtivos, como a ponte Brasil-Paraguai.

A Tabela 6 apresenta o investimento em energia para a rota logística de exportação 3. O total de energia investida foi de $7,51E+16$ sej/km-ano. Este montante inclui as fases de construção e de operação do sistema rodoviário, além da operação do sistema marítimo. Como era esperado devido à sua complexidade, o investimento em energia na etapa de construção rodoviária (73,32% do total) foi superior às etapas de operação rodoviária e marítima desta rota.

Tabela 6. Cálculo da emergia investida (em sej/km-ano) para a rota logística de exportação 3.

Item	Quantidade ¹	Unidade/km-ano	UEV ²	Unidade	Emergia (sej/km-ano)	% parcial	% total
Fase construção - sistema rodoviário							
Aço	5.05E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	1.02E+15	1.84	1.35
Aço (pontes, viadutos e trevos)	2.70E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	5.42E+14		
Aço (equipamentos)	2.35E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	4.73E+14		
Concreto	2.58E+00	m³	4.39E+15	sej/m³	1.13E+16	20.53	15.05
Diesel	3.14E+02	l	5.10E+12	sej/l	1.60E+15	2.91	2.13
Brita	5.21E+01	ton	1.27E+14	sej/ton	6.62E+15	12.02	8.81
Areia	5.92E+00	ton	1.42E+14	sej/ton	8.41E+14	1.53	1.12
Filler	1.19E+00	ton	1.27E+14	sej/ton	1.51E+14	0.27	0.20
Cimento	3.29E+00	ton	2.50E+14	sej/ton	8.21E+14	1.49	1.09
Cascalho	2.58E+02	ton	1.27E+14	sej/ton	3.27E+16	59.39	43.54
Água	1.80E+01	ton	7.29E+11	sej/ton	1.31E+13	0.02	0.02
CM-30	6.90E+02	l	4.41E+08	sej/l	3.04E+11	0.00	0.00
Mão de obra	1.14E-01	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	1.76E+06	0.00	0.00
Emergia total investida na construção da rodovia (CR)					5.51E+16	100.00	73.32
Fase de operação - sistema rodoviário							
Aço dos veículos	6.33E+03	kg	2.01E+12	sej/kg	1.27E+16	70.52	16.93
Diesel	1.04E+03	l	5.10E+12	sej/l	5.32E+15	29.48	7.08
Mão de obra	1.18E+00	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	1.82E+07	0.00	0.00
Emergia total investida na operação da rodovia (OR)					1.80E+16	100.00	24.01
Fase de operação - sistema marítimo							
Aço dos navios	1.51E+02	kg	2.01E+12	sej/kg	3.03E+14	15.10	0.40
Diesel	3.34E+02	l	5.10E+12	sej/l	1.70E+15	84.90	2.27
Mão de obra	4.24E-03	pessoas	1.54E+07	sej/pessoa	6.53E+04	0.00	0.00
Emergia total investida na operação marítima (OM)					2.01E+15	100.00	2.67
Investimento em emergia (CR+OR+OM)					7.51E+16		100.00

¹ Os dados estão disponíveis na Tabela 2.

² As UEVs estão na Earth Baseline atual (12.00E+24 sej/ano); detalhes disponíveis no Apêndice A.

Na fase de construção do sistema rodoviário, que representa 73,32% da emergia total, destaca-se o uso intensivo de materiais, como o cascalho, cuja contribuição foi de 3,27E+16 sej/km-ano, o que representa 59,39% da emergia dessa fase e 43,54% da emergia total da rota. O concreto e a brita também tiveram participações relevantes, com 20,53% e 12,02% da emergia da construção, respectivamente. Outros materiais, como areia, cimento e diesel, contribuíram com percentuais inferiores, enquanto itens, como CM-30 e mão de obra, representaram uma fração mínima do total investido.

A fase de operação rodoviária representa 24,01% da emergia total, e o aço dos veículos foi o principal insumo; foi responsável por 1,27E+16 sej/km-ano, ou seja, 70,52% da emergia da operação rodoviária e 16,93% da emergia total. O consumo de diesel se destacou com 29,48% da emergia da operação e 7,08% da emergia total.

A operação marítima ficou responsável por 2,67% da emergia total; foi influenciada quase totalmente pelo consumo de diesel, o que respondeu por 84,90%

dessa fase, o equivalente a $1,70\text{E}+15$ sej/km-ano. Já o uso de aço nos navios contribuiu com 15,10% da energia marítima e 0,40% da energia total.

A análise da rota logística de exportação 3 evidencia que a etapa de construção rodoviária influenciou negativamente a energia total desse sistema, com 73,32% da energia total. Neste sentido, é importante destacar que somente o cascalho representa quase metade da energia total da rota (43,54%). Assim, sugerem-se, como ações prioritárias alternativas para o método construtivo que utiliza o cascalho como o uso de materiais reciclados, reaproveitamento de resíduos da construção civil e técnicas de pavimentação mais eficientes. Além disso, para os sistemas logísticos avaliados anteriormente, a etapa de operação marítima revelou baixa influência na energia investida na rota logística de exportação 3.

Em uma análise geral dos resultados, conforme o apresentado na Tabela 7, pode-se observar que a rota logística de exportação 1 tem o maior investimento total em energia ($6,70\text{E}+17$ sej/km-ano), se comparada as rotas 2 e 3. Destaca-se que a parte operacional da rota logística de exportação 1 responde por 69,98% do total investido, bem acima dos valores correspondentes aos das demais rotas: rota logística de exportação 2 (54,30%) e rota logística de exportação 3 (24,01%). O resultado para as três alternativas logísticas de exportação evidencia a preponderância da fase de operação rodoviária que, se combinada com a fase de construção do sistema rodoviário, representa em média 97% do total de energia investida. Em paralelo, a operação do sistema marítimo representa uma fração muito menor.

Tabela 7. Resultado geral para o indicador energia.

Rotas	Energia (sej/km-ano)	Construção rodoviária (%)	Operação rodoviária (%)	Operação marítima (%)
Rota logística de exportação 1	$6,70\text{E}+17$	26,13	69,98	3,89
Rota logística de exportação 2	$2,36\text{E}+17$	42,50	54,30	3,21
Rota logística de exportação 3	$7,51\text{E}+16$	73,32	24,01	2,67

Em relação à contribuição total para o indicador energia, a rota logística de exportação 1 apresentou o maior percentual de energia investida para o uso do aço em veículos e contêineres na etapa de operação rodoviária (59,32%). Isto foi seguido pelo concreto (14,69%) usado na infraestrutura da rodovia e pelo diesel (10,66%) também gasto na operação rodoviária. No caso da rota logística de exportação 2, há uma maior porcentagem de energia investida em aço na etapa de operação rodoviária (45,79%). Em sequência, vem o cascalho (30,16%) na etapa de construção da

rodovia. Já para a rota logística de exportação 3, o cascalho alcançou a maior contribuição para o indicador energia com 43,54%. Seguiram-no o aço na operação rodoviária (16,93%) e o concreto rodoviário (15,05%).

Ao se analisar as contribuições parciais, ou seja, as contribuições dos insumos para cada etapa de avaliação, observa-se que o concreto foi o insumo que mais contribuiu para a energia total investida na construção da rodovia na rota logística de exportação 1, seguido pelo cascalho. O inverso se configurou para as rotas logísticas de exportação 2 e 3, onde o cascalho apresentou o maior impacto, seguido pelo concreto. Por se tratar de obras de construção de rodovias, poderiam ser esperados valores similares proporcionalmente para a etapa de construção. Contudo, o maior consumo de concreto para a rota logística de exportação 1 pode ser explicado pelo fato de que esta rota possui um maior número de obras de artes especiais (56 viadutos, 31 pontes e 64 trevos), se comparada às rotas 2 (32 viadutos, 22 pontes e 11 trevos) e 3 (11 viadutos, 62 pontes e 43 trevos). Complementarmente, esses valores podem ser observados pela extensão dessas obras de arte especiais. Por ordem decrescente, tem-se 15,96km na rota logística de exportação 1; 7,81km na rota logística de exportação 3; 4,78km na rota logística de exportação 2 (item #6, das Tabelas E5, E7 e E9, disponíveis no Apêndice E). O concreto contabilizado no inventário foi utilizado nos “tabuleiros” das pontes, viadutos e trevos. Nessas obras de infraestrutura, não se utiliza o cascalho, material das camadas de capa base e sub-base; nos trechos de pavimentação (sobre as camadas de capas base e sub-base), não se utiliza o concreto armado.

A análise do indicador energia possibilitou compreender a carga ambiental causada pelas rotas logísticas de exportação, além de destacar características construtivas diferentes nas rodovias das três rotas estudadas. Os resultados mostraram um maior investimento em energia para a rota logística de exportação 1, aproximadamente 3 vezes superior ao da rota logística de exportação 2 e 9 vezes superior ao da rota logística de exportação 3. Avaliando exclusivamente a energia investida, a rota logística de exportação 3 deveria ser priorizada, já que ela requer um menor investimento em energia, se comparada às demais rotas. Contudo, outros fatores precisam ser melhor entendidos. Por exemplo, a rota logística de exportação 3 apresentou menor carga ambiental; porém, investiu muita energia na etapa de construção e não possui a mesma capacidade de carga que as rotas 1 e 2. Neste

caso, sugere-se o uso de indicadores complementares para avaliar variáveis importantes para a tomada de decisão, como o apresentado na próxima seção.

4.1.2.2 Indicador de emissões de CO₂-eq.

A Tabela 8 apresenta os valores das emissões de CO₂-eq. associadas às três rotas logísticas de exportação, expressas em kgCO₂-eq. por quilômetro por ano. Os resultados mostraram diferenças e similaridades entre as alternativas avaliadas. Em uma análise geral, percebe-se que a rota logística de exportação 1 apresentou o maior valor de emissões, com 9,47E+05 kgCO_{2eq}/km-ano, superando as demais rotas. Esse valor é 3,7 vezes superior ao obtido pela rota logística de exportação 2, 2,57E+05 kgCO_{2eq}/km-ano; é ainda 27 vezes superior ao obtido pela rota logística de exportação 3, 3,45E+04 kgCO_{2eq}/km-ano.

Assim como na síntese em emergia, ao se calcular as emissões de CO₂, é possível identificar aspectos mais específicos ao se adotar uma perspectiva sistêmica e se analisar os processos subjacentes. Por exemplo, entre as três rotas logísticas de exportação avaliadas, a que necessita de ações prioritárias é a rota logística de exportação 1, pois apresentou o maior impacto sobre o meio ambiente, medido em kgCO₂-eq. Posteriormente, deve-se então identificar qual(is) a(s) etapa(s) que mais interfere(m) negativamente no resultado. Logo, os resultados mostraram que as emissões diretas da etapa de operação rodoviária contribuíram com aproximadamente 95% do total das emissões para a rota logística de exportação 1, cujo valor foi de 9.06E+05 kgCO_{2eq}/km-ano. Esse valor corresponde quase totalmente à utilização de aço em veículos e contêineres, 9,00E+05 kgCO_{2eq}/km-ano. Assim, sugere-se que ações a curto prazo, quando possível, foquem na substituição do material por outro menos poluente, foquem ainda no uso de material reciclado. Além disto, que se dê atenção a estratégias voltadas à modernização da frota e à melhoria da logística de carregamento, o que pode contribuir para reduzir o número de veículos necessários, diminuir, conseqüentemente, as emissões associadas à fabricação do aço.

Tabela 8. Resultado do indicador emissões de CO₂-eq.: emissões indiretas e diretas por rota logística de exportação.

Item	Potencial de Aquecimento Global (em kgCO ₂ eq./km-ano)		
	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Emissões indiretas			
Fase construção - sistema rodoviário	1.81E+04	3.96E+03	3.27E+03
Aço	1.18E+04	2.66E+03	2.30E+03
Concreto	5.84E+03	9.04E+02	6.71E+02
Diesel	2.33E+02	1.98E+02	1.46E+02
Brita	5.89E-04	4.99E-04	3.99E-04
Areia	6.69E-05	5.65E-05	4.53E-05
Filler	6.55E-05	5.53E-05	4.44E-05
Cimento	4.19E-03	3.52E-03	2.82E-03
Cascalho	3.40E-03	4.29E-03	1.97E-03
CM-30	2.33E+02	1.93E+02	1.55E+02
Fase de operação - sistema rodoviário	9.06E+05	2.46E+05	2.92E+04
Aço dos veículos	9.00E+05	2.45E+05	2.88E+04
Diesel	6.51E+03	1.83E+03	4.85E+02
Fase de operação - sistema marítimo	1.02E+04	2.95E+03	8.42E+02
Aço dos navios	8.13E+03	2.35E+03	6.87E+02
Diesel	2.05E+03	5.96E+02	1.55E+02
Emissões indiretas totais	9.34E+05	2.53E+05	3.33E+04
Emissões diretas ^a			
CH ₄	1.83E+01	5.37E+00	1.70E+00
CO ₂	1.28E+04	3.74E+03	1.18E+03
N ₂ O	1.23E+02	3.60E+01	1.14E+01
Emissões diretas totais	1.29E+04	3.78E+03	1.20E+03
Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ eq./km-ano)	9.47E+05	2.57E+05	3.45E+04

O procedimento de cálculo das emissões de CO₂-eq. está disponível no Apêndice I.

^a Emissões diretas devido a combustão do diesel nos motores.

As rotas logísticas de exportação 2 e 3 apresentaram comportamentos semelhantes ao observado na rota 1. No caso da rota 2, por exemplo, as emissões indiretas, associadas ao uso de aço na fase de operação, corresponderam a aproximadamente 95% do total das emissões e evidenciou-se novamente o papel crucial desse insumo no impacto ambiental das rotas analisadas. Além disso, apesar de serem proporcionalmente mais baixas em relação ao uso do aço, as emissões diretas de CO₂-eq., decorrentes da combustão do diesel nos motores dos veículos nas rotas 1 e 2, representaram a segunda maior contribuição para o total de emissões. De qualquer forma, quando não for viável agir diretamente sobre o insumo de maior impacto, deve-se direcionar esforços para o item subsequente na hierarquia de contribuição. Isso mostra que é possível focar na eficiência do uso do combustível, seja por meio da adoção de tecnologias veiculares mais eficientes ou do uso de biocombustíveis de menor intensidade emissora. Alternativas poderiam focar-se na transição para motores híbridos ou elétricos, na manutenção da frota para otimizar o consumo e até na capacitação dos motoristas para condução econômica.

No caso da rota logística de exportação 3, que apresentou o menor impacto ambiental entre as alternativas analisadas, o aço utilizado na etapa de operação foi novamente o principal responsável pelas emissões totais de CO₂, embora em menor proporção, representando 83% do total. Em seguida, destacou-se também o aço empregado na etapa de construção das rodovias, que contribuiu com aproximadamente 7% das emissões e reforçou a relevância desse material ao longo de todo o ciclo logístico.

Esses resultados reforçam a importância da escolha modal como estratégia para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no setor logístico. A priorização de rotas com menor emissão de CO₂-eq. pode ser um caminho tanto para o cumprimento de metas ambientais, quanto para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade da infraestrutura de transporte e exportação. Essa predominância pode ser evidenciada ao se observar que o transporte rodoviário apresentou impactos superiores, quando comparado ao modal marítimo, em termos de emissões de CO₂-eq.

4.1.2.3 Indicador de custos financeiros

A Tabela 9 apresenta os custos econômicos em 'km-ano' para cada rota logística de exportação; ela considera os componentes: (i) construção da rodovia, (ii) operação rodoviária (combustível de caminhões e pedágios) e (iii) operação marítima (combustível de navios). No que se refere ao custo de construção da infraestrutura rodoviária, observa-se que a rota logística de exportação 2 (MS – Paranaguá – Xangai) apresenta o maior valor (R\$206.000,00/km-ano), seguida pela rota logística de exportação 1 (MS – Santos – Xangai), com R\$187.000,00/km-ano, e pela rota logística de exportação 3 (MS – Chile – Xangai), com R\$134.000,00/km-ano. Apesar de a rota logística 3 ser a mais longa (2.465,04 km), seu custo de construção por quilômetro-ano é o menor, o que pode ser atribuído à predominância de trechos com menor padrão de pavimentação. Já as rotas logísticas 1 e 2, com extensões semelhantes (1.096,44 km e 1.057,52 km, respectivamente), incluem trechos com maior padrão de rodovia, variando de pista simples até quatro faixas de rolamento, em cada sentido, o que justifica seus custos mais elevados.

Os custos operacionais rodoviários e marítimos resultam da combinação entre a extensão das rotas e o número de veículos e navios necessários ao transporte anual

da carga exportada. A análise mostra que, embora a rota logística 3 envolva uma logística mais complexa, já que atravessa países como Brasil, Paraguai, Argentina e Chile, seus custos totais são os mais baixos entre as alternativas avaliadas. Isso se deve, em parte, à menor densidade de veículos e navios estimados na operação simulada. Os custos totais (R\$/km-ano) foram: rota logística 1: R\$347.000,00; rota logística 2: R\$240.000,00; rota logística 3: R\$146.000,00

Tabela 9. Custos econômicos em 'km-ano' por rota logística de exportação.

Alternativas logísticas	Unid.	Construção da rodovia ¹	Operação rodoviária ²		Operação marítima ³	Total
			Combustível caminhões	Pedágio	Combustível navios	
Rota 1 (MS - Santos - Xangai)	R\$/km-ano	1.87E+05	8.39E+04	4.97E+04	2.64E+04	3.47E+05
Rota 2 (MS - Paranaguá - Xangai)	R\$/km-ano	2.06E+05	2.36E+04	2.46E+03	7.67E+03	2.40E+05
Rota 3 (MS - Chile - Xangai)	R\$/km-ano	1.34E+05	6.25E+03	3.70E+03	2.00E+03	1.46E+05

¹ Detalhes na Tabela H5 do Apêndice H.

² Detalhes na Tabela H6 do Apêndice H.

³ Detalhes na Tabela L1 do Apêndice L.

Cabe destacar ainda dois pontos relevantes: (a) as rotas logísticas 1 e 2 estão integralmente localizadas em território brasileiro, enquanto a rota logística 3 atravessa múltiplas fronteiras, o que pode implicar desafios adicionais de natureza operacional, regulatória e alfandegária; (b) a infraestrutura da rota logística 3 ainda está em desenvolvimento, com trechos em obras de pavimentação, o que pode afetar a viabilidade de curto prazo, mas também indica potencial de melhoria futura.

Por fim, observa-se que a rota logística 1 apresenta o maior custo com pedágios (R\$49.700,00/km-ano), o que reflete sua maior quantidade de praças de cobrança, em comparação com a rota logística 2 (R\$24.600,00/km-ano). Para a rota logística 3, esse valor foi estimado com base na média entre as duas primeiras rotas; considerou-se a ausência de dados consolidados sobre o sistema de pedágio na totalidade do trajeto.

4.1.2.4 Indicador tempo de viagem

A Tabela 10 mostra o tempo de viagem e a distância para as três rotas logísticas de exportação a partir de Campo Grande/MS por via rodoviária para portos no Brasil e no Chile e, posteriormente, por via marítima para o principal porto da China. O indicador tempo de viagem não depende da unidade 'km-ano', ou seja, ele

permanecerá o mesmo para quaisquer situações. As rotas logísticas de exportação 1 e 2 apresentam um tempo total de viagem similar, fato que se justifica pela proximidade geográfica entre os portos de Santos/SP e Paranaguá/PR e, conseqüentemente, distâncias aproximadas. Ao contrário, a rota logística de exportação 3 se destaca pela maior extensão rodoviária, com previsão de 30 horas e 30 minutos de viagem. A análise dos tempos de navegação a partir do Porto de Iquique/Chile indica que o tempo total de transporte rodoviário e marítimo é menor, quando é comparado às rotas logísticas de exportação 1 e 2. Essa disparidade é de aproximadamente 4 dias em relação às outras rotas.

Tabela 10. Tempo de viagem aos portos da China (modais rodoviários e marítimos).

Portos de destino na China	Tempo de viagem			Distância (km)		Total (km)
	Mar ¹	Rodovia ²	Total	Mar	Rodovia	
Rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP – Xangai/China	46d02h	11h	46d13h	20476	1057,52	21533,52
Rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR – Xangai/China	46d07h	12h	46d19h	20578	1096,44	21674,44
Rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile – Xangai/China	41d10h	30,5h	42d16,5h	18409	2465,04	20874,04

¹Modal marítimo, simulado por <https://sea-distances.org/>

²Modal rodoviário, simulado por <https://qualp.com.br>

É importante destacar que os valores para o indicador tempo de viagem foram obtidos por meio de simulações que utilizaram os sistemas <https://sea-distances.org/> e <https://qualp.com.br>. Portanto, ressalta-se que a complexidade logística da rota 3 é maior devido à travessia de quatro países e à necessidade de passar por, no mínimo, três postos de fronteira, o que pode implicar tempos de espera adicionais nas aduanas. Em geral, a nova rota pelo Oceano Pacífico confere ao Brasil uma vantagem competitiva estratégica; ela proporciona um tempo de transporte menor para o mercado asiático, especialmente para o porto de Xangai na China, e otimiza as operações logísticas.

4.1.3 Aplicação do modelo de tomada de decisão

A aplicação da ferramenta multicritério de apoio à decisão tem como objetivo identificar a rota logística de exportação mais adequada com base em múltiplos critérios de desempenho já definidos no *framework* proposto: energia, emissões de CO₂-eq., custo e tempo de viagem. Essa é uma etapa crucial do *framework* proposto,

pois possibilita decidir sobre qual rota logística implementar; consideram-se tanto aspectos ambientais, quanto os operacionais e econômicos.

A Tabela 11 apresenta os valores absolutos dos indicadores para as três rotas logísticas de exportação avaliadas. Observa-se que a rota 1 (Campo Grande - Santos - Xangai) apresenta os maiores impactos ambientais e os custos mais elevados. Já a rota 3 (Campo Grande - Chile - Xangai) apresenta os resultados mais positivos em todos os critérios considerados.

Tabela 11. Matriz de decisão apresentando os resultados dos indicadores.

Alternativas logísticas	Indicadores			
	Energia (sej/km-ano)	Emissão CO ₂ -eq. (kgCO ₂ /km-ano)	Custo (R\$/km-ano)	Tempo de viagem (dias/viagem)
Rota 1 (MS - Santos - Xangai)	6.70E+17	9.47E+05	3.47E+05	46,54
Rota 2 (MS - Paranaguá - Xangai)	2,36E+17	2,57E+05	2,40E+05	46,79
Rota 3 (MS - Chile - Xangai)	7,51E+16	3,45E+04	1,46E+05	42,69
Objetivo do critério	Minimização	Minimização	Minimização	Minimização

Na avaliação multicritério, os indicadores previamente calculados foram utilizados para quantificar o desempenho de cada rota logística de exportação. Assim, como já apresentado na seção de Métodos, a função valor neste trabalho é do tipo que se deseja minimizar. Logo, os valores foram transformados, usando-se $v'_j(a_i) = 1 / v_j(a_i)$, mantendo-se cardinalidade para uma escala de razão. Posteriormente, os dados foram normalizados pelo método mín./máx., o que resultou valores no intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$; pesos foram atribuídos a cada critério. Assim, foi possível obter um índice composto (valor global) que resume a performance de cada alternativa. Nesse contexto, valores globais maiores indicam alternativas mais vantajosas; valores menores revelam desempenhos menos favoráveis.

Conforme apresentado na Tabela 12, todos os critérios receberam peso igual (0,25); refletiram uma abordagem imparcial na comparação entre aspectos ambientais, econômicos e operacionais. No entanto, vale destacar que a atribuição dos pesos pode ser ajustada conforme as prioridades do tomador de decisão. A combinação entre os dados normalizados e os pesos definidos permitiu a obtenção de um *escore* final para cada rota, o que facilitou sua classificação e posterior seleção.

Tabela 12. Aplicação da abordagem multicritério.

Alternativas (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂	Custo	Tempo de viagem		
Ponderação ^a (k _j)	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-
Rota 1 (MS - Santos - Xangai)	0.00	0.00	0.00	0.06	0.014	3º
Rota 2 (MS - Paranaguá - Xangai)	0.23	0.10	0.32	0.00	0.164	2º
Rota 3 (MS - Chile - Xangai)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000	1º

Com base nesses resultados, conclui-se que a rota logística de exportação 3 deve ser priorizada para implementação, pois obteve o maior valor global (v_a) considerando-se os quatro critérios avaliados. Essa alternativa se mostra com um menor impacto ambiental; mostra-se mais econômica e mais eficiente; é, portanto, a mais vantajosa sob uma perspectiva sistêmica e é a mais alinhada com os princípios de desenvolvimento sustentável aplicados à logística de exportação.

4.2 Aplicação em estudo de caso para a carne bovina do Mato Grosso do Sul

Para qualquer ferramenta, método ou modelo desenvolvido, é importante considerar um estudo de caso para a sua validação. Isto foi feito para avaliar a aplicabilidade prática do *framework* proposto nesta tese para avaliação de rotas logísticas de exportação. Embora o *framework* possa ser aplicado a diferentes produtos, setores ou sistemas logísticos, optou-se por focar na cadeia de exportação de carne bovina do estado de Mato Grosso do Sul para a China. A escolha deste produto se justifica pela sua relevância econômica para o estado e pela complexidade logística envolvida no transporte até o destino. No entanto, é importante destacar que a metodologia adotada é flexível e poderia ser adaptada para outros contextos logísticos. Bastaria ajustar os parâmetros e as características específicas do sistema analisado. O estudo de caso contribui para validar o modelo proposto e ilustra como as diferentes variáveis, como energia e emissões de CO₂-eq., associadas a um produto específico, podem influenciar a escolha da melhor rota logística de exportação.

Analisar rotas logísticas de forma isolada, sem considerar as características do produto transportado, pode conduzir a decisões não adequadas. Isso ocorre, porque diferentes produtos possuem exigências específicas em termos de tempo de transporte, de condições de conservação, de custos, de modais mais adequados, entre outros fatores que impactam diretamente a viabilidade e a eficiência de determinada rota logística. Por exemplo, uma rota que apresenta menor custo total

pode não ser a mais adequada para produtos perecíveis, que demandam agilidade e maior controle de temperatura. Nesse sentido, a escolha da rota logística mais apropriada deve ser feita com base não apenas nos atributos em si, mas também nas particularidades do produto transportado. Assim, dependendo do tipo de produto, uma rota, que, inicialmente, parecesse menos vantajosa, poderia, na prática, se revelar a melhor opção.

4.2.1 Análise dos indicadores

A Tabela 13 mostra os resultados dos indicadores para o estudo de caso que considera a carne bovina exportada por três diferentes rotas logísticas. Anteriormente, os resultados foram discutidos com base na unidade 'km-ano', o que possibilitou uma discussão voltada ao *framework* proposto. Para o estudo de caso, considerou-se a seguinte unidade funcional: 1 tonelada de carne bovina transportada do Mato Grosso do Sul até o porto de Xangai na China.

Tabela 13. Resultados para os indicadores do *framework* proposto por unidade funcional.

Alternativas logísticas	Indicadores			
	Energia sej/km-ton. carne*	Emissão CO ₂ kgCO ₂ /km- ton. carne*	Custo R\$/km-ton. carne*	Tempo de viagem dia/viagem
Rota 1 (MS - Santos - Xangai)	7,77E+11	1,10E+00	4,02E-01	46,54
Rota 2 (MS - Paranaguá - Xangai)	9,72E+11	1,06E+00	9,87E-01	46,79
Rota 3 (MS - Chile - Xangai)	1,17E+12	5,38E-01	2,28E+00	42,69

*valores da Tabela 11 (unid./km-ano) divididos pela quantidade de carne que é transportada em cada rota logística de exportação.

Ao analisar o indicador energia investida, enquanto a rota logística de exportação 1 apresenta o melhor desempenho para o indicador energia para o transporte de carne bovina, observa-se que a rota logística de exportação 3 foi a que demandou mais recursos por tonelada de carne transportada até o porto de Xangai, na China. Esses resultados contrastam com aqueles apresentados na seção 4.2.1, na qual foram avaliadas apenas as etapas de construção e de operação dos modais rodoviário e marítimo por km de via, sem a consideração de um produto específico como estudo de caso. Essa divergência pode ser explicada, principalmente pela quantidade de carne bovina efetivamente exportada em cada rota logística.

Ainda que a rota logística de exportação 3 demande uma menor quantidade de recursos para sua construção e operação (7,51E+16 sej/km-ano), o baixo volume de carne bovina transportado por essa rota compromete sua eficiência em energia

(1,17E+12 sej/km-ton.carne), quando comparada com as rotas logísticas de exportação 1 (7,77E+11 sej/km-ton.carne) e 2 (9,72E+11 sej/km-ton.carne). Isso ocorre, porque os recursos investidos não são diluídos sobre uma maior quantidade de produto transportado, fato que resulta um valor 'sej/km/ton.carne' mais elevado. Portanto, a análise baseada em um produto real evidencia que a escolha da melhor rota logística não pode se basear apenas em dados estruturais ou operacionais dos modais. É fundamental considerar a escala e a natureza do fluxo logístico envolvido.

O mesmo aconteceu para o indicador custo. Inicialmente, a rota logística de exportação 3 alcançou um melhor desempenho (1,46E+05 R\$/km-ano) em relação às rotas 1 e 2. Já o resultado para o estudo de caso (2,28E+00 R\$/km-ton.carne) foi comparativamente negativo. O valor de 2,28E+00 R\$/km-ton.carne da rota logística de exportação 3 foi 2,3 vezes superior ao valor obtido para a rota logística de exportação 2 (9,87E-01 R\$/km-ton.carne) e 5,6 vezes superior ao valor da rota logística de exportação 1 (4,02E-01 R\$/km-ton.carne).

Para o indicador emissões de CO_{2-eq.}, os resultados foram proporcionais àqueles obtidos anteriormente, ao se discutir o desempenho das rotas logísticas de exportação sem considerar um produto como estudo de caso. Novamente, a rota logística de exportação 3 apresentou a menor quantidade de emissões (5,38E-01 kgCO_{2eq}/km-ton.carne), se comparada às rotas logísticas de exportação 1 (1,10E+00 kgCO_{2eq}/km-ton.carne) e 2 (1,06E+00 kgCO_{2eq}/km-ton.carne). O valor obtido para a rota de exportação 3 foi aproximadamente 2 vezes inferior aos valores obtidos pelas rotas logísticas de exportação 1 e 2. Ao analisar exclusivamente o aspecto das emissões de CO_{2-eq.} por tonelada de carne transportada, pode-se afirmar que a rota logística de exportação 3 apresentou o melhor desempenho ambiental entre os sistemas avaliados.

Destaca-se que o indicador tempo de viagem (dias/viagem) não foi normalizado pela unidade funcional (km-ton.carne na China), porque ele representa o tempo necessário para realizar o percurso completo entre a origem e o destino, independentemente da quantidade de carga transportada. Ou seja, se uma viagem transportar 1 tonelada ou 1.000 toneladas, o tempo necessário para completar o trajeto será o mesmo; considera-se que se trata do mesmo modal, da mesma velocidade média e das mesmas condições operacionais. Esse indicador está mais relacionado ao desempenho temporal da rota logística do que à eficiência por unidade de produto. Por esse motivo, ele foi mantido como um indicador absoluto por viagem,

e não relativo à quantidade transportada. Isso permite analisar a agilidade do sistema logístico, sem que o valor seja distorcido por variações na escala de carga, o que poderia mascarar eventuais gargalos ou vantagens operacionais relevantes para a tomada de decisão.

4.2.2 Decidindo sobre qual rota logística de exportação deveria ser priorizada

A Tabela 14 mostra a matriz de decisão multicritério, elaborada a partir dos resultados apresentados na tabela 13, para auxiliar na tomada de decisão sobre qual alternativa logística deveria ser priorizada em políticas públicas. É importante ressaltar que a função valor é do tipo que se deseja minimizar. Portanto, os valores foram transformados, usando-se $v'_j(a_i) = 1 / v_j(a_i)$; posteriormente, os resultados foram normalizados.

Observa-se que a rota logística de exportação 1 obteve o melhor desempenho logístico global (maior valor global); alcançou a primeira colocação com um valor global de 0,514. A rota logística de exportação 1 apresentou os melhores resultados para os indicadores energia e custo, além de um desempenho similar ao da rota logística de exportação 2 para o indicador tempo de viagem (0,06). Ela indicou um tempo relativamente mais longo em comparação à rota logística de exportação 3. Apesar disso, a rota logística de exportação 1 apresentou um desempenho negativo para o indicador emissão de CO_{2-eq.}, quando comparada às outras alternativas logísticas.

Tabela 14. Aplicação da abordagem multicritério.

Alternativas (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂	Custo	Tempo de viagem		
Ponderação ^a (k _j)	0,25	0,25	0,25	0,25	-	-
Rota 1 (MS - Santos - Xangai)	1,00	0,00	1,00	0,06	0,514	1º
Rota 2 (MS - Paranaguá - Xangai)	0,41	0,04	0,28	0,00	0,182	3º
Rota 3 (MS - Chile - Xangai)	0,00	1,00	0,00	1,00	0,500	2º

A rota logística de exportação 3 foi classificada em segundo lugar, com um valor global de 0,500. Ao contrário da rota logística de exportação 1, a alternativa 3 apresentou desempenhos inferiores em energia e custo. No entanto, destacou-se por obter um resultado positivo para os indicadores emissão de CO_{2-eq.} e tempo de viagem. Apesar de situar-se na segunda posição geral, a rota logística de exportação 3 (0,500)

obteve um desempenho bastante similar ao obtido pela rota logística de exportação 1 (0,514). De forma geral, a rota logística de exportação 3 demanda uma maior quantidade de recursos naturais e emite uma menor quantidade de CO₂-eq. na atmosfera por tonelada de carne exportada. Ela possui também o maior investimento financeiro para a operação do transporte de carne bovina e o menor tempo de viagem até o porto de Xangai na China.

A rota logística de exportação 2 ficou com a 3ª posição geral, com um valor global de 0,182. A alternativa logística 2 obteve um desempenho negativo para o tempo de viagem, e seu desempenho nos demais critérios foi intermediário: 0,41 para energia, 0,04 para emissão de CO₂-eq. e 0,28 para custo. O desempenho da rota logística de exportação 2 mostrou que ser mediana em todos ou na maioria dos critérios pode ser menos vantajoso do que ter excelência em alguns e fraco desempenho em outros, dependendo das ponderações e da natureza dos indicadores. Esse resultado reforça a importância da análise multicritério na escolha de rotas logísticas; considera os *trade-offs* entre os diferentes objetivos e restrições envolvidos no processo decisório.

4.3 Possíveis cenários para a exportação de carne bovina

A Figura 8 mostra os quatro cenários elaborados, simulando a quantidade de carne exportada entre as três rotas logísticas, com base em diferentes estratégias operacionais. Esses cenários foram elaborados com o objetivo de avaliar alternativas operacionais para o escoamento de cargas de carne bovina do Mato Grosso do Sul; eles permitiram uma análise comparativa da viabilidade e da eficiência logísticas.

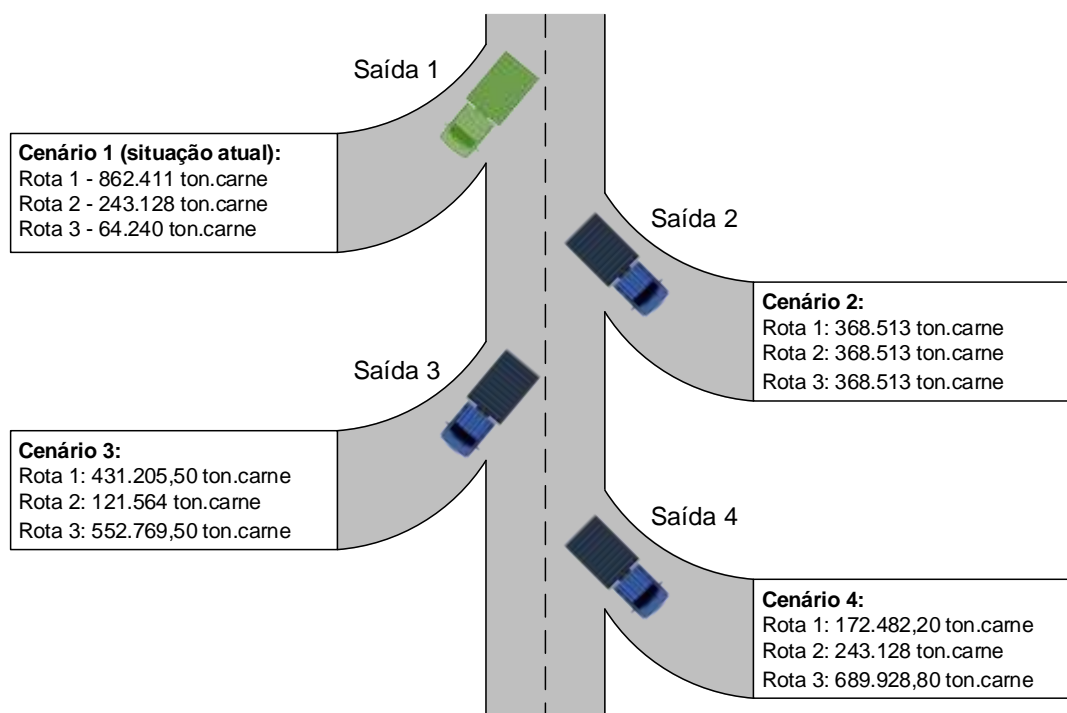


Figura 8. Situação atual e cenários simulados.

O Cenário 1, considerado como a situação atual (já discutido na seção 4.2), apresenta valores de cargas reais para o ano de 2023 para as rotas logísticas 1 (862.411 toneladas de carne) e 2 (243.128 toneladas de carne), e um valor projetado para a rota logística 3 que está em fase de implementação (64.240 toneladas de carne). Já no Cenário 2, observa-se uma redistribuição equitativa das cargas; os volumes anteriormente concentrados nas rotas 1 e 2 são divididos igualmente entre as três rotas, o que totaliza 368.513 toneladas de carne para cada alternativa logística. Esse cenário quer balancear o fluxo logístico.

No Cenário 3, a estratégia adotada consiste em transferir 50% das cargas atualmente movimentadas nas rotas 1 e 2 para a rota 3, e isto resulta um aumento na utilização da rota logística 3 (552.769,5 toneladas de carne) em relação ao cenário referência. Por fim, o Cenário 4 propõe a transferência de 80% da carga da rota logística de exportação 1 para a rota 3; ele mantém o volume de carne transportada pela rota logística 2 constante, o que resulta 689.928,80 toneladas de carne exportadas pela rota logística 3.

A Tabela 15 mostra os resultados da simulação da distribuição de cargas de carne entre as três rotas logísticas de exportação, com base nos quatro cenários elaborados. A Tabela 15 apresenta também o somatório dos resultados dos indicadores emergia, emissão de CO₂-eq. e custo financeiro para cada cenário, e

possibilita uma comparação entre eles. A variação na quantidade de carne exportada não influencia o indicador tempo de viagem, motivo pelo qual possui o mesmo resultado para todos os cenários.

Tabela 15. Resultados obtidos com a simulação da quantidade de carne transportada entre as rotas logísticas de exportação para cada cenário.

Cenários	Indicadores			
	Energia (sej/km-ton.carne)	Emissão de CO _{2eq} (kgCO _{2eq} /km-ton.carne)	Custo (R\$/km-ton.carne)	Tempo de viagem (dias/viagem)
Cenário 1 (situação atual)	2.92E+12	2.694	3.67	
Rota 1	7.77E+11	1.10	0.40	46.54
Rota 2	9.72E+11	1.06	0.99	46.79
Rota 3	1.17E+12	0.54	2.28	42.69
Cenário 2	2.34E+12	2.75	1.94	
Rota 1	1.05E+12	1.12	0.69	46.54
Rota 2	8.30E+11	1.06	0.70	46.79
Rota 3	4.61E+11	0.58	0.55	42.69
Cenário 3	2.78E+12	2.686	2.98	
Rota 1	9.80E+11	1.12	0.62	46.54
Rota 2	1.39E+12	1.08	1.93	46.79
Rota 3	4.11E+11	0.49	0.43	42.69
Cenário 4	2.95E+12	2.73	2.64	
Rota 1	1.59E+12	1.18	1.27	46.54
Rota 2	9.72E+11	1.06	0.99	46.79
Rota 3	3.91E+11	0.49	0.38	42.69

Dados resultantes da simulação da quantidade de carne transportada em cada cenário são apresentados no Apêndice M, Tabela M1.

Observa-se que o Cenário 2, caracterizado pela distribuição equitativa das cargas entre as três rotas logísticas, apresentou os melhores desempenhos nos indicadores energia investida (2,34E+12 sej/km-ton.carne) e custo (1,94 R\$/km-ton.carne). Esses resultados sugerem que uma distribuição mais balanceada das cargas pode ser eficiente não apenas do ponto de vista logístico, mas também do ambiental, pela redução no uso dos recursos naturais e econômicos, pelo menor custo operacional envolvido no transporte de carne.

Por outro lado, o Cenário 1 (situação atual) apresentou o maior custo operacional entre os cenários simulados (3,67 R\$/km-ton.carne) e a segunda maior energia investida (2,924E+12 sej/km-ton.carne). Isto evidenciou uma possível ineficiência da configuração atual da rede logística, que concentra a maior parte do fluxo na rota logística de exportação 1. Trata-se de um aspecto importante para políticas públicas futuras, já que decisões são atualmente baseadas no fator econômico. Neste cenário, a maior quantidade de carne é exportada para Xangai, China, ao se utilizar a rota logística 1, por meio do porto de Santos, Brasil. Uma

possível redistribuição do volume de carne exportada em cada rota logística poderia promover ganhos ambientais, logísticos e econômicos, como o representado pelo Cenário 2.

O Cenário 4, apesar de propor uma maior redistribuição da carga da rota logística 1 para a rota logística 3, apresentou o maior valor de energia investida ($2,95E+12$ sej/km-ton.carne) entre os cenários. Além disso, o resultado do indicador emissões de CO_{2-eq.} do Cenário 4 foi de 2,73 kgCO_{2eq.}/km-ton.carne, valor bastante similar ao obtido pelo Cenário 2, 2,75 kgCO_{2eq.}/km-ton.carne. Esse resultado indica que mudanças pontuais na carga de uma única rota, sem considerar o sistema como um todo, podem não ser suficientes para gerar benefícios.

Já o Cenário 3, que transfere 50% das cargas das rotas logísticas de exportação 1 e 2 para a rota logística de exportação 3, mostra-se intermediário quanto aos indicadores globais. Apesar disso, o Cenário 3 revelou um bom desempenho na redução das emissões de CO_{2-eq.}, cujo valor de 2,686 kgCO_{2eq.}/km-ton.carne é similar àquele do Cenário 1, 2,694 kgCO_{2eq.}/km-ton.carne. Por fim, a análise comparativa dos cenários reforça a importância de estratégias integradas e criteriosas de redistribuição logística para otimizar o desempenho global da cadeia de exportação.

4.3.1 Aplicação do modelo de tomada de decisão

Para avaliar de forma mais abrangente os cenários de distribuição logística propostos, foi aplicada a análise multicritério, considerando-se diferentes pesos para os indicadores de desempenho. Essa abordagem permite simular diferentes prioridades de decisão; ela reflete contextos distintos de gestão, como foco ambiental ou econômico. A seguir, são apresentados os resultados obtidos a partir da variação dos pesos atribuídos a cada critério.

A Tabela 16 mostra o resultado da aplicação da abordagem multicritério com pesos iguais para todos os indicadores: energia, emissão de CO_{2-eq.}, custo e tempo de viagem. Ao se aplicar o mesmo peso para os indicadores, o Cenário 2 se destaca como a alternativa com melhor desempenho geral, pois apresenta um valor global de 0,500, seguido pelos Cenários 3 e 1. O Cenário 4 mostrou-se como o menos favorável. Esse resultado reforça a robustez do Cenário 2, que combina equilíbrio ambiental e econômico, conforme já sugerido na Tabela 15, e o fato evidencia que uma

distribuição equitativa das cargas entre as rotas favorece a sustentabilidade e a eficiência logística do sistema.

Tabela 16. Multicritério aplicado aos cenários, considerando-se o mesmo peso para cada indicador.

Simulações (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂	Custo	Tempo de viagem ^a		
Ponderação ^a (k _j)	0.25	0.25	0.25	0.25	-	-
Cenário 1	0.04	0.87	0.00	-	0.228	3 ^o
Cenário 2	1.00	0.00	1.00	-	0.500	1 ^o
Cenário 3	0.23	1.00	0.26	-	0.374	2 ^o
Cenário 4	0.00	0.31	0.44	-	0.186	4 ^o

^ao tempo de viagem é o mesmo para todos os cenários.

A tabela 17 mostra a aplicação do multicritério, priorizando o critério energia investida; nela, é atribuído um peso de 70% para o indicador. Os resultados mostraram que o Cenário 2 continua sendo a melhor opção com valor global de 0,800, indicando um bom desempenho para os indicadores energia investida e custo financeiro. O Cenário 1, situação atual, apresenta desempenho comparativamente baixo, com valor de 0,115, na frente apenas do Cenário 4, que permanece como a alternativa menos viável. Este resultado mostra que, quando a minimização do uso de recursos é o principal objetivo, a redistribuição balanceada das cargas é a solução que deveria ser priorizada.

Tabela 17. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador energia.

Simulações (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂	Custo	Tempo de viagem ^a		
Ponderação ^a (k _j)	0.7	0.1	0.1	0.1	-	-
Cenário 1	0.04	0.87	0.00	-	0.115	3 ^o
Cenário 2	1.00	0.00	1.00	-	0.800	1 ^o
Cenário 3	0.23	1.00	0.26	-	0.290	2 ^o
Cenário 4	0.00	0.31	0.44	-	0.074	4 ^o

^ao tempo de viagem é o mesmo para todos os cenários.

A tabela 18 mostra a aplicação do multicritério, priorizando agora o critério emissões de CO_{2-eq.}, e é atribuído um peso de 70% para este indicador. Ao contrário das aplicações anteriores, quando se atribui maior peso à emissão de CO_{2eq.}, o Cenário 3 passa a ocupar a melhor posição geral, com valor global de 0,749. Esse resultado reflete sua menor emissão de CO_{2-eq.} total entre os cenários simulados, conforme verificado na Tabela 15. No entanto, essa priorização ambiental penaliza o Cenário 2 que, conquanto tenha os melhores desempenhos para os indicadores energia investida e custo financeiro, ocupa a última posição. Isso revela que o Cenário 3, assim como o Cenário 1, apesar de menos eficientes economicamente, ainda

podem ser interessantes do ponto de vista ambiental, levando-se em conta emissões de CO₂-eq., especialmente em políticas voltadas à descarbonização da cadeia logística.

Tabela 18. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador emissão de CO₂eq.

Simulações (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂ -eq.	Custo	Tempo de viagem ^a		
Ponderação ^a (k _j)	0.1	0.7	0.1	0.1	-	-
Cenário 1	0.04	0.87	0.00	-	0.615	2 ^o
Cenário 2	1.00	0.00	1.00	-	0.200	4 ^o
Cenário 3	0.23	1.00	0.26	-	0.749	1 ^o
Cenário 4	0.00	0.31	0.44	-	0.259	3 ^o

^ao tempo de viagem é o mesmo para todos os cenários.

A Tabela 19 mostra os resultados do multicritério aplicado aos cenários, preferenciando o indicador custo. Verificou-se que, ao dar prioridade ao custo financeiro com peso de 70%, o Cenário 2 apresenta novamente o melhor desempenho entre os cenários, com valor global de 0,800, o que confirma sua viabilidade econômica. O Cenário 1 mantém-se como o menos atrativo de forma geral. Esta análise reafirma que o Cenário 2 oferece a melhor combinação de baixo custo com bom desempenho ambiental, o que se enfatiza pelo uso de recursos naturais; é a alternativa mais robusta em contextos em que a contenção de gastos é fator decisivo.

Tabela 19. Multicritério aplicado aos cenários com peso de 70% para o indicador custo financeiro.

Simulações (a _i)	Critérios (v _j) / Indicadores				Valor Global (v _a)	Classificação
	Energia	Emissão de CO ₂ -eq.	Custo	Tempo de viagem ^a		
Ponderação ^a (k _j)	0.1	0.1	0.7	0.1	-	-
Cenário 1	0.04	0.87	0.00		0.091	4 ^o
Cenário 2	1.00	0.00	1.00		0.800	1 ^o
Cenário 3	0.23	1.00	0.26		0.305	3 ^o
Cenário 4	0.00	0.31	0.44		0.337	2 ^o

^ao tempo de viagem é o mesmo para todos os cenários.

Com base nas análises apresentadas, pode-se afirmar que a simulação de cenários permitiu identificar alternativas mais resilientes para o escoamento da carne bovina, indo-se de Mato Grosso do Sul a Xangai. O Cenário 2, caracterizado pela distribuição equitativa das cargas entre as três rotas, obteve o melhor desempenho global nos aspectos econômico e ambiental; é robusto, independente da prioridade atribuída aos critérios de decisão. Em contrapartida, a situação atual (Cenário 1) mostrou-se a menos eficiente, com maior custo e mais elevada energia investida. Isso indica, de acordo com os critérios adotados, a necessidade de reestruturação da configuração logística vigente.

4.4 Discussão dos Resultados

O *framework* proposto nesta tese busca subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à seleção de rotas logísticas de exportação mais adequadas sob uma perspectiva multicritério, assim como nos trabalhos de Dini, Yaghoubi e Bahrami (2024) e Rashidian, Eydi e Roghanian (2024). Para isso, foram considerados critérios, como uso de recursos naturais, emissões, custos e tempo de operação. A aplicabilidade do *framework* foi verificada em três rotas logísticas de exportação do Mato Grosso do Sul, Brasil, com destino a Xangai, China; ela permitiu identificar as diferenças de desempenho entre as alternativas analisadas.

Para uma avaliação mais ampla e estratégica, o *framework* foi aplicado às três rotas logísticas sem se levar em conta um produto específico. O fato garantiu que, ao concluir essa etapa, qualquer produto que possa ser exportado seja facilmente inserido na análise. Os resultados mostraram que a rota logística de exportação 3 se sobressaiu em todos os indicadores analisados, com suas emissões de CO₂-eq., seus custos financeiros, seu tempo de viagem e sua menor demanda por recursos ambientais por km-ano (Tabela 11). Esses resultados estão fortemente alinhados à literatura que enfatiza a importância de abordagens integradas para a avaliação de sistemas logísticos sustentáveis. Mahdinia *et al.* (2018), por exemplo, ressaltam que o desempenho sustentável de sistemas de transporte deve considerar simultaneamente as dimensões ambiental, social e econômica. Eles propõem modelos baseados em múltiplos indicadores ponderados para subsidiar decisões mais completas e robustas.

A utilização da síntese em emergia, conforme o proposto por Odum (1996), representa um diferencial importante desta tese. Tal abordagem, ao considerar o lado do doador de recursos, permite quantificar de maneira sistêmica a energia ambiental incorporada em todas as etapas do sistema logístico (da construção à operacionalização), o que não é contemplado em análises baseadas unicamente em emissões ou custos. Como discutido por Cristiano e Gonella (2019), a análise em emergia tem se mostrado útil para revelar contradições em projetos considerados eficientes sob métricas convencionais, mas apresenta elevado custo ambiental oculto. Meng *et al.* (2017) destaca que a análise integrada que utiliza emergia, além de

capturar custos ocultos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de sistemas de transporte, evidencia a relevância de uma abordagem multidimensional no planejamento de políticas públicas sustentáveis.

Além disso, o resultado que favorece a rota logística de exportação 3 sob a perspectiva multicritério vai ao encontro do argumento de que rotas mais longas, porém com melhor desempenho operacional e ambiental no transporte marítimo, podem ser vantajosas, especialmente em cenários de alta sensibilidade ambiental ou metas rigorosas de descarbonização. Isso está em consonância com os estudos de Du Plessis *et al.* (2023), que evidenciam a importância de otimizar o transporte refrigerado com foco na eficiência energética, e de Xie *et al.* (2022), que destacam o papel crescente da logística marítima na redução da pegada ecológica, especialmente em países exportadores.

No cenário brasileiro, os estudos de Lopes *et al.* (2017), De Oliveira *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2024) reforçam que a intermodalidade e o uso de corredores alternativos - como o proposto pela rota logística de exportação 3 via Chile - podem reduzir os custos logísticos e as emissões, mesmo que exijam investimentos iniciais mais altos em infraestrutura. Essa constatação corrobora a recomendação da presente tese de que, se o objetivo for maximizar a sustentabilidade sistêmica, políticas públicas devem considerar não apenas o desempenho atual, mas também os impactos de longo prazo em termos de uso de solo, de emissões acumuladas e de pressão sobre recursos naturais.

A aplicação de abordagem multicritério como ferramenta de apoio à decisão pública é amplamente reconhecida na literatura como essencial para sistemas complexos, como o de transporte (Octaviansyah *et al.*, 2024; Chen, Hu, Liu, 2024). Essa abordagem permite considerar diferentes visões e objetivos — econômicos, ambientais, logísticos — pois reflete a realidade dos formuladores de políticas e dos gestores logísticos. A tese reforça essa prática ao propor e validar um *framework* que pode ser replicado em outras cadeias logísticas, o que contribui para políticas públicas mais eficientes, alinhadas com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 9 (infraestrutura), 11 (mobilidade sustentável) e 13 (ação climática).

Posteriormente, um estudo de caso incluiu a carne bovina exportada do Mato Grosso do Sul, Brasil, para Xangai, China, alterando os resultados. Esse estudo revelou que maior volume de carga dilui os recursos investidos e melhora a eficiência

de um sistema. Nesse contexto, a rota logística 1, por onde se exporta a maior quantidade de carne bovina entre as três alternativas avaliadas, apresentou melhor desempenho nos indicadores energia investida e custo financeiro; ela se destaca como a alternativa que deveria ser priorizada no transporte de carne bovina. Esse comportamento é compatível com o que foi relatado por Du Plessis *et al.* (2023), que observaram que o fator de carga afeta diretamente os indicadores de eficiência ambiental no transporte refrigerado.

Ainda na análise do estudo de caso com carne bovina, as emissões de CO₂-eq. continuaram sendo menores na rota logística 3, o que confirma sua vantagem no aspecto ambiental. Contudo, o custo dessa rota também foi o mais elevado, o que a torna menos atrativa quando critérios econômicos são considerados de forma isolada. Este tipo de *trade-off* foi evidenciado por Mishra *et al.* (2024), ao projetar cenários futuros na Índia, nos quais políticas ambientais mais rigorosas (como eletrificação da frota) resultaram em benefícios ambientais, ainda que com maiores custos de transporte.

A terceira etapa da análise realizada com o *framework* considerou diferentes cenários de redistribuição de cargas entre as rotas logísticas, bem como variações na ponderação dos indicadores. Entre os cenários avaliados, o cenário 2 — que propôs uma distribuição equilibrada das cargas entre as três rotas de exportação — apresentou o melhor desempenho nos indicadores: custo econômico e energia investida. Já o cenário 1, que representa a configuração atual, ficou em terceiro lugar quando adotada uma ponderação equilibrada entre os indicadores. Destaca-se ainda que a sensibilidade dos resultados às alterações nos pesos dos indicadores, observada na etapa final da análise, reforça a utilidade do método multicritério como ferramenta de apoio à decisão, especialmente quando diferentes atores estão envolvidos e quando prioridades estratégicas variam.

Portanto, os resultados obtidos não apenas validam o *framework* desenvolvido, como também ilustram sua aplicabilidade e sua relevância no contexto brasileiro e internacional, o que contribui para preencher uma lacuna identificada por Muschett (2000) sobre a ausência de ferramentas sistêmicas para apoiar a sustentabilidade em cadeias logísticas globais.

5. CONCLUSÕES

Esta tese propõe um *framework* para avaliação de rotas logísticas, avaliação que combina indicadores tradicionais, como custo e tempo de viagem, com métricas ambientais, a exemplo da energia e das emissões de CO₂-eq.. Ao integrar múltiplas dimensões, o *framework* proposto oferece suporte mais abrangente à tomada de decisão, alinhando-se às diretrizes da Agenda 2030 da ONU e às exigências contemporâneas por desenvolvimento econômico com responsabilidade ambiental.

A aplicação do *framework*, envolvendo três rotas logísticas de exportação, permitiu comparações entre os sistemas analisados por três perspectivas:

- a) A aplicação da metodologia proposta na unidade "km-ano" permitiu apresentar o passo a passo do *framework* em uma avaliação detalhada. Neste caso, evidenciou-se a rota logística de exportação 3 como a mais eficiente sob a ótica ambiental, econômica e operacional.
- b) Aplicou-se o *framework* também em um estudo de caso que considerou a carne bovina exportada a partir do Mato Grosso do Sul, Brasil, até Xangai, China, na unidade "km-ton.carne". Ao avaliar o produto exportado, a rota logística 1 se destacou com o melhor desempenho entre as três alternativas estudadas, com menor uso de recursos e maior benefício econômico por tonelada transportada.
- c) As simulações de cenários mostraram que a distribuição equilibrada das cargas entre as rotas tende a maximizar os benefícios ambientais e econômicos. A priorização de uma única rota logística de exportação, como no cenário concentrado na rota logística 1, cenário 1, e rota logística 3, cenário 4, compromete o desempenho global e reforça a importância de estratégias logísticas diversificadas e integradas.

A avaliação com base na energia revelou ser um diferencial, ao permitir que o desempenho ambiental fosse considerado em pé de igualdade com os aspectos econômicos, tradicionalmente priorizados. Isso confere à metodologia adotada uma capacidade ampliada de subsidiar políticas públicas mais equilibradas e eficazes, especialmente em contextos de infraestrutura emergente, como o da Rota Bioceânica. Ainda assim, reconhecem-se limitações relacionadas à disponibilidade de dados primários, à incerteza associada a obras ainda em implementação e à mudança de mentalidade dos decisores. Sugere-se que estudos futuros explorem o uso do *framework* em outras cadeias logísticas e modais de transporte, bem como que ele

integre novos critérios sociais e ambientais e fortaleça sua capacidade de orientar decisões em contextos diversos.

Conclui-se que o *framework* proposto representa uma importante contribuição, tanto do ponto de vista teórico, quanto do prático, ao oferecer uma abordagem metodológica consistente e aplicável a diferentes sistemas logísticos. Ao permitir a avaliação comparativa de rotas sob múltiplas perspectivas (econômica, ambiental e operacional), o *framework* fortalece o suporte técnico à formulação de políticas públicas e à priorização de investimentos em infraestrutura logística voltadas à sustentabilidade. Espera-se que este trabalho incentive o uso de abordagens sistêmicas na análise de cadeias logísticas e contribua para decisões mais informadas, responsáveis e alinhadas aos desafios do transporte no Brasil e no mundo.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se como propostas para trabalhos futuros os itens que seguem:

- a) Desenvolver um *software* ou aplicativo para utilização do *framework* de avaliação por agências públicas e privadas para auxiliar a tomada de decisão;
- b) Considerar um cenário futuro com a utilização de veículos de carga elétricos;
- c) Realizar uma análise da situação geopolítica;
- d) Aplicar o *framework* proposto em outros sistemas logísticos, considerando outros produtos, além da carne bovina, e outros modais de transporte;
- e) Evidenciar outros indicadores, como os custos econômicos aduaneiros, os custos de manutenção etc.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, Samuel; BOATENG, Elliot; ACHEAMPONG, Alex O. Transport energy consumption and environmental quality: does urbanization matter?. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140617, 2020.
- AGOSTINHO, Feni; SILVA, Richard Thames; ALMEIDA, Cecília M.V.Bôas; LIU, Gengyuan; GIANNETTI, Biagio F. Sustainability assessment procedure for operations and production processes (SUAPRO). **Science of the total environment**, v. 685, p. 1006-1018, 2019.
- ALMEIDA, Adiel Teixeira de. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. Editora Atlas SA, 2013. ISBN 978-85-224-8011-1.
- ALMEIDA, C. A.; SELEME, R.; CARDOSO-NETO, J. Rodovia transoceânica: uma alternativa logística para o escoamento das exportações da soja brasileira com destino à China. **Revista Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 51, n.2 jan./jun. 2013.
- AMARAL, Luis P.; MARTINS, Nelson; GOUVEIA, Joaquim B. A view of emergy theory, its application and latest developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 882-888, 2016.
- AZADGOLEH, Mehrdad Asadi; MOHAMMADI, M.; JAFARI, Hessam Azari; SANTOS, João; AHMADI, Arman; ALAVI, Mohammad Zia; AYAR, Pooyan. A comparative life cycle assessment (LCA), life cycle cost analysis (LCCA), mechanical and long-term leaching evaluation of road pavement structures containing multiple secondary materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 458, p. 142484, 2024.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. Tradução Raul Rubenich. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, v. 20, 2006.
- BRASIL, 2017a. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1a. ed. Brasília, 2017. Volume 03: Equipamentos.
- BRASIL, 2017b. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1a. ed. Brasília, 2017. Volume 10: Manuais Técnicos. Conteúdo 02 - Pavimentação/Usinagem.
- BROWN, Mark T.; CAMPBELL, Daniel E.; ULGIATI, Sergio; FRANZESE, Pier P. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. **Ecological Modelling**, v. 339, p. 92-95, 2016.
- CAMPOS, Renan Stenico; SIMON, Alexandre Tadeu; DE CAMPOS MARTINS, Felipe. Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 995-1004, 2019.

- CHAUDHARY, Abhishek; AKHTAR, Amaan. A novel approach for environmental impact assessment of road construction projects in India. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 106, p. 107477, 2024.
- CHEN, Wei; LIU, Wenjing; GENG, Yong; BROWN, Mark T.; GAO, Cuixia; WU, Ru. Recent progress on emergy research: A bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1051-1060, 2017.
- CHEN, Xinghui; HU, Xinghua; LIU, Haobing. Low-Carbon Route Optimization Model for Multimodal Freight Transport Considering Value and Time Attributes. **Socio-Economic Planning Sciences**, p. 102108, 2024.
- CHEN, Zhongfei; ANTUNES, Jorge; WÄNKE, Peter; ZHOU, Mengling. Sustainability drivers in road transportation system: Evidence from China. **Science of the total environment**, v. 798, p. 149259, 2021.
- CHENG, Haoyu; CHAUDHRY, Hassan Rauf; KAZI, Irfan; UMAR, Muhammad. Unlocking greener supply chains: A global innovative perspective on the role of logistics performance in reducing ecological footprints. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 9, n. 4, p. 100612, 2024.
- CNT, 2022a. Confederação Nacional do Transporte. Boletim Unificado. In: Boletins. CNT. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Acesso em: 23 nov 2024.
- CNT, 2022b. Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de rodovias 2022. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- CRISTIANO, Silvio; GONELLA, Francesco. To build or not to build? Megaprojects, resources, and environment: An emergy synthesis for a systemic evaluation of a major highway expansion. **Journal of cleaner production**, v. 223, p. 772-789, 2019.
- DE OLIVEIRA, Andréa Leda Ramos; MARSOLA, Karina Braga; MILANEZ, Ana Paula; FATORETTO, Sandra Liège Renner. Performance evaluation of agricultural commodity logistics from a sustainability perspective. **Case Studies on Transport Policy**, v. 10, n. 1, p. 674-685, 2022.
- DENTE, Sébastien MR; TAVASSZY, Lóránt. Policy oriented emission factors for road freight transport. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 61, p. 33-41, 2018.
- DINI, Niloofar; YAGHOUBI, Saeed; BAHRAMI, Hamideh. Route selection of periodic multimodal transport for logistics company: An optimisation approach. **Research in Transportation Business & Management**, v. 54, p. 101123, 2024.
- DU PLESSIS, Martin Johannes; EEDEN, Joubert van; GOEDHALS-GERBER, Leila L.; ELSE, Jacques. Calculating Fuel Usage and Emissions for Refrigerated Road Transport Using Real-World Data. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 117, p. 103623, 2023.

- FEDERICI, M.; ULGIATI, Sergio; BASOSI, Riccardo. Air versus terrestrial transport modalities: An energy and environmental comparison. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1493-1503, 2009.
- FRASER, Andrew; CHESTER, Mikhail V. Environmental and economic consequences of permanent roadway infrastructure commitment: city road network lifecycle assessment and Los Angeles County. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 22, n. 1, p. 04015018, 2016.
- GOHARI, Adel; AHMAD, Anuar B.; BALASBANEH, Ali T.; GOHARI, Ali; HASAN, Razi; SHOLAGBERU, Abdulkadir T. Significance of intermodal freight modal choice criteria: MCDM-based decision support models and SP-based modal shift policies. **Transport Policy**, v. 121, p. 46-60, 2022.
- GRANT, David B. **Gestão de logística e cadeia de suprimentos**. 1a. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.
- HASAN, Umair; WHYTE, Andrew; ALJASSMI, Hamad. A multi-criteria decision-making *framework* for sustainable road transport systems: Integrating stakeholder-cost-environment-energy for a highway case study in United Arab Emirates. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, p. 141831, 2024.
- HÖTZEL, Maria José; VANDRESEN, Bianca. Brazilians' attitudes to meat consumption and production: Present and future challenges to the sustainability of the meat industry. **Meat Science**, v. 192, p. 108893, 2022.
- HUANG, Shupeii; AN, Haizhong; VIGLIA, Silvio; FIORENTINO, Gabriella; CORCELLI, Fabiana; FANG, Wei; ULGIATI, Sérgio. Terrestrial transport modalities in China concerning monetary, energy and environmental costs. **Energy policy**, v. 122, p. 129-141, 2018.
- INTI, Sundeep; TANDON, Vivek. Towards precise sustainable road assessments and agreeable decisions. **Journal of Cleaner Production**, v. 323, p. 129167, 2021.
- ISO 14040, 2006a. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Acesso em: 8 set 2024.
- ISO 14044, 2006b. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38498.html>. Acesso em: 8 set 2024.
- ITF – International Transport Forum, 2021. ITF Transport Outlook 2021, OECD Publishing, Paris. Disponível em: <https://www.itf-oecd.org/worldwide-transport-activity-double-emissions-rise-further>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- JEON, Christy Mihyeon; AMEKUDZI, Adjo A.; GUENSLER, Randall L. Sustainability assessment at the transportation planning level: Performance measures and indexes. **Transport policy**, v. 25, p. 10-21, 2013.
- JIANG, Meizhi; WANG, Benmei; HAO, Yingjun; CHEN, Shijun; WEN, Yuanqiao; YANG, Zaili. Quantification of CO2 emissions in transportation: An empirical analysis by modal shift from road to waterway transport in Zhejiang, China. **Transport Policy**, v. 145, p. 177-186, 2024.

- KHURSHID, Adnan; KHAN, Khalid; SALEEM, Sardar F.; CIFUENTES-FAURA, Javier; CALIM, Adrian C. Driving towards a sustainable future: Transport sector innovation, climate change and social welfare. **Journal of Cleaner Production**, v. 427, p. 139250, 2023.
- LEE, Eul-Bum; THOMAS, David K.; ALLEMAN, Douglas. Incorporating road user costs into integrated life-cycle cost analyses for infrastructure sustainability: A case study on Sr-91 corridor improvement project (Ca). **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 179, 2018.
- LEREDE, Daniele; PINTO, Giuseppe; SACCONI, Mirko; BUSTREO, Chiara; CAPOZZOLI, Alfonso; SAVOLDI, Laura. Application of a Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis to support decision-making within a macro-scale energy model: Case study of the electrification of the road European transport sector. **Energy**, v. 236, p. 121444, 2021.
- LOPES, Harlenn S.; LIMA, Renato S.; LEAL, Fabiano; NELSON, Aline C. Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State. **Research in Transportation Business & Management**, v. 25, p. 66-75, 2017.
- MAHDINIA, Iman; HABIBIAN, Meeghat; HATAMZADEH, Yaser; GUDMUNDSSON, Henrik. An indicator-based algorithm to measure transportation sustainability: A case study of the US states. **Ecological Indicators**, v. 89, p. 738-754, 2018.
- MENG, Fanxin; LIU, Gengyuan; YANG, Zhifeng; CASAZZA, Marco; CUI, Shenghui; ULGIATI, Sergio. Energy efficiency of urban transportation system in Xiamen, China. An integrated approach. **Applied energy**, v. 186, p. 234-248, 2017.
- MESJASZ-LECH, Agata; WŁODARCZYK, Aneta. The role of logistics infrastructure in development of sustainable road transport in Poland. **Research in Transportation Business & Management**, v. 44, p. 100841, 2022.
- MISHRA, Nirmalendu Bikash; PANI, Agnivesh; BANSAL, Prateek; MOHAPATRA, Smruti S.; SAHU, Prasanta K. Towards sustainable logistics in India: Forecasting freight transport emissions and policy evaluations. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 133, p. 104267, 2024.
- MOHAPATRA, Subhashree; MOHANACHANDRAN, Dileep; DWIVEDI, Gaurav; KESHARVANI, Sujeet; HARISH, V.S.K.V.; VERMA, Shrey; VERMA, Puneet. A comprehensive study on the sustainable transportation system in India and lessons to be learned from other developing nations. **Energies**, v. 16, n. 4, p. 1986, 2023.
- MOUETTE, Dominique; MACHADO, Pedro G.; FRAGA, Denis; PEYERL, Drielli; BORGES, Raquel R.; BRITO, Thiago L. F.; SHIMOMAEBARA, Lena A.; SANTOS, Edmilson C. Costs and emissions assessment of a Blue Corridor in a Brazilian reality: The use of liquefied natural gas in the transport sector. **Science of the total environment**, v. 668, p. 1104-1116, 2019.
- MUSCHETT, F. Douglas. Sustainability impact assessments: a new comprehensive *framework* for raising the bar beyond existing environmental assessments. **International Journal of Sustainable Development**, v. 3, n. 3, p. 257-275, 2000.

- OCTAVIANSYAH, Decky; BUCHARI, Erika; ARLIANSYAH, Joni; NAWAWI, Nobel. Multi-criteria analysis as a method for selecting the best route of hinterland connections: Case study in South Sumatra, Indonesia. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 40, n. 1, p. 22-29, 2024.
- ODUM, H. T. **Environmental accounting: emergy and environmental decision making**. New York: Wiley; 1996.
- RASHIDIAN, Fateme; EYDI, Alireza; ROGHANIAN, Emad. Reliable and green road-rail routing using a hybrid procedure of DANP, COCOSO, and FMEA criticality methods: A case study of cement transportation network in Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 447, p. 141250, 2024.
- REZA, B.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. Emergy-based life cycle assessment (Em-LCA) for sustainability appraisal of infrastructure systems: a case study on paved roads. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, p. 251-266, 2014.
- REZA, Bahareh; SADIQ, Rehan; HEWAGE, Kasun. A fuzzy-based approach for characterization of uncertainties in emergy synthesis: an example of paved road system. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 99-110, 2013.
- RIBEIRO, Filipe Batista; DO NASCIMENTO, Filipe Almeida Correa; DA SILVA, Marcelino Aurélio Vieira. Environmental performance analysis of railway infrastructure using life cycle assessment: Selecting pavement projects based on global warming potential impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, p. 132558, 2022.
- SEMAGRO, 2024. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar. Disponível em: <https://www.semagro.ms.gov.br/>. Acesso em: 18 de set. 2024.
- United Nations, 2024. The 17 goals. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 21 set. 2024.
- VITAL, Filipe; IOANNOU, Petros. Scheduling and shortest path for trucks with working hours and parking availability constraints. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 148, p. 1-37, 2021.
- WANG, Zhan; MARTHA JR., Geraldo B.; LIU, Jing; LIMA, Cícero Z.; HERTEL, Thomas W. Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural production and carbon emissions. **Science of The Total Environment**, v. 928, p. 172434, 2024.
- WU, Haizhen; FAN, Weiguo; LU, Jianchang. Researching on the sustainability of transportation industry based on a coupled emergy and system dynamics model: A case study of Qinghai. **Sustainability**, v. 13, n. 12, p. 6804, 2021.
- XIE, Benkai; ZHANG, Xiaoxiao; LU, Junling; LIU, Fan; FAN, Yuqing. Research on ecological evaluation of Shanghai port logistics based on emergy ecological footprint models. **Ecological Indicators**, v. 139, p. 108916, 2022.
- ZHAO, Yu; DUAN, Xiaoyang; YU, Miao. Calculating carbon emissions and selecting carbon peak scheme for infrastructure construction in Liaoning Province, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 420, p. 138396, 2023.

ZHOU, Dejun; KONGKUAH, Maxwell; TWUN, Angelina Kissiwaa; ADAM, Ibrahim. Assessing the impact of international trade on ecological footprint in Belt and Road Initiative countries. **Heliyon**, v. 10, n. 4, 2024.

APÊNDICES

Apêndice A. *Unit emergy values* (UEVs) coletadas de literatura para aplicar a síntese em emergia.

Neste apêndice são apresentadas as UEVs utilizadas no cálculo da emergia (Tabela A1) e o memorial de cálculo para deixá-las na mesma baseline (Tabela 2).

Tabela A1. Fatores de conversão ou *Unit Emergy Values* (UEVs) utilizados no cálculo da emergia.

N. ^a	Item	Unit	Original UEV	Original Unit	Original Bsl.	Source ^b	Conversion	UEV	Unit
#1	Steel	kg	1,58E+15	sej/t	9,44E+24	Pan <i>et al.</i> , 2016	1,27	2,01E+12	sej/kg
#2	Concrete	m ³	1,44E+09	sej/g	9,44E+24	Buranakarn, 1998	1,27	4,39E+15	sej/m ³
#3	Diesel	l	1,81E+05	sej/J	1,52E+25	Brown <i>et al.</i> , 2011	0,79	5,10E+12	sej/l
#4	Gravel	ton	1,00E+09	sej/g	9,44E+24	Odum, 1996	1,27	1,27E+14	sej/ton
#5	Sand	ton	1,12E+09	sej/g	9,44E+24	Brown; Buranakarn, 2003	1,27	1,42E+14	sej/ton
#6	Filler	ton	1,00E+09	sej/g	9,44E+24	Odum, 1996	1,27	1,27E+14	sej/ton
#7	Cement	ton	1,97E+09	sej/g	9,44E+24	Buranakarn, 1998	1,27	2,50E+14	sej/ton
#8	Gravel	ton	1,00E+09	sej/g	9,44E+24	Odum, 1996	1,27	1,27E+14	sej/ton
#9	Water (supply system)	ton	5,73E+11	sej/m ³	9,44E+24	Buenfil, 2001	1,27	7,29E+11	sej/ton
#10	CM-30 (cutback asphalt)	l	3,47E+05	sej/g	9,44E+24	Huang; Hsu, 2003	1,27	4,41E+08	sej/l
#11	Labor	person	2,04E+07	sej/person	1,58E+25	Faria, 2017	0,76	1,54E+07	sej/person

^a O memorial de cálculo é apresentado na Tabela A2 deste apêndice.

^b Todas as UEVs coletadas em literatura são convertidos para a *baseline* atual da Terra = 1,20E+25 seJ/ano (Brown et al, 2016), usada como referência neste estudo.

UEVs não incluem serviços e mão de obra.

A *baseline* terrestre é refletida pela emergia total que impulsiona a biosfera em um ano na forma de radiação solar, calor geotérmico e potencial gravitacional.

A emergia total que impulsiona a biogeosfera é a soma das fontes solares, das marés e de calor profundo, totalizando 1,20E+25 seJ/ano (Brown et al, 2016).

Obs.: filler = brita = cascalho, considerados para o cálculo das UEVs originais.

Tabela A2. Memorial de cálculo dos fatores de conversão ou Unit Emery Values (UEVs) utilizados no cálculo do indicador Índice de Retorno de Emergia.

Item	Memorial de cálculo
#1	$(1.58\text{E}+15 \text{ seJ/t without L\&S from Pan et al, 2016}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10^{-3} \text{ t/kg})$
#2	$(1.44\text{E}+09 \text{ seJ/g ready-mixed concrete from Buranakarn, 1998}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10^3 \text{ g/kg}) * (\text{densidade, } 2400 \text{ kg/m}^3)$
#3	$(1.81\text{E}+05 \text{ seJ/J from Brown et al., 2011}) * (4186 \text{ J/kcal}) * (10\text{E}+04 \text{ kcal/kg from Agostinho et al, 2013}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 15.2\text{E}+24 \text{ seJ/yr}^{-1} \text{ Brown \& Ulgiati, 2010}) * (0,853 \text{ kg/L, densidade})$
#4	$(1.00\text{E}+09 \text{ seJ/g after Buranakarn, 1998, original source Odum, 1996 p. 310}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10\text{E}+06 \text{ g/ton})$
#5	$(1.12\text{E}+09 \text{ seJ/g, Brown and Buranakarn, 2003}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10\text{E}+06 \text{ g/ton})$
#6	$(1.00\text{E}+09 \text{ seJ/g after Buranakarn, 1998, original source Odum, 1996 p. 310}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10\text{E}+06 \text{ g/ton})$
#7	$(1.97\text{E}+09 \text{ seJ/g, Buranakarn, 1998}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10\text{E}+06 \text{ g/ton})$
#8	$(1.00\text{E}+09 \text{ seJ/g after Buranakarn, 1998, original source Odum, 1996 p. 310}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}) * (10\text{E}+06 \text{ g/ton})$
#9	$(68.52\text{E}+10 \text{ seJ/m}^3 - 5.98\text{E}+10 \text{ seJ / m}^3 \text{ opening and maintenance} - 3.22\text{E}+10 \text{ seJ/m}^3 \text{ chemical cost} - 2.01\text{E}+10 \text{ plant construction and upgrade} = 57.31 \text{ E}+10 \text{ seJ / m}^3 \text{ from Buefill, 2001, p.80}) * (12\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 9.44\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum, 1996 baseline}); \text{ by assuming pure water where } 1 \text{ m}^3 \text{ correspond to } 1000 \text{ ton; \% renewability from Giannetti et al., (2015)}$
#10	considerado densidade de 1:1
#11	$(1.95\text{E}+25 \text{ seJ/yr emery BR 2018 from Faria, 2017}) / ((2.09\text{E}+08 \text{ ppl BR 2018}) * (3000 \text{ Kcal/day}) * (365 \text{ day/yr}) * (4184 \text{ J/kcal}) * (12.00\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} / 15.83\text{E}+24 \text{ seJ*yr}^{-1} \text{ Odum 2000 baseline})); 15.2\% \text{ Renewability of Brazilian labor from Giannetti et al., 2015}$

Apêndice B. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP - 1057,52 km.

Tabela B1. Dados dos trechos, tipo de via, obras de arte especiais e extensão da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP.

Nº	Trecho	Rodovia	Tipo de via	Viadutos	Pontes	Trevos	Extensão (km)	Acumulado (km)
1	Av. Afonso Pena, saída da cidade (de 0°27'53.64"S 54°37'18.30"O a 20°33'13.43"S 54°33'22.11"O)	vias urbanas; BR-163	via urbana e simples	0	0	0	16,85	16,85
2	MS-040, Bataguassu e ponte (de 20°33'13.43"S 54°33'22.11"O a 21°46'39.68"S 52° 9'16.41"O)	MS-040; MS-038; MS-267	simples	0	6	0	325,02	341,87
3	Presidente Epitácio (ponte) a Presidente Prudente, Trevo 8 (de 21°46'39.68"S 52°9'16.41"O a 21°59'24.62"S 51°39'17.82"O)	SP-270	duplicado	5	2	3	57,37	399,24
4	Presidente Prudente, Trevo 8 a Ourinhos, Trevo 62 (de 21°59'24.62"S 51°39'17.82"O a 22°55'35.95"S 49°49'28.58"O)	SP-270; SP-327	duplicado	5	3	27	222,33	621,57
5	Ourinhos, Trevo 62 a Sorocaba, Trevo 100 (de 22°55'35.95"S 49°49'28.58"O a 23°24'2.76"S 47°20'9.64"O)	SP-327; SP-225; SP-280	duplicado	9	4	24	281,47	903,04
6	Sorocaba, Trevo 100 a Osasco, V7.1 (de 23°24'2.76"S 47°20'9.64"O a 23°30'39.60"S 46°48'35.56"O)	SP-280	triplicado	3	2	3	58,8	961,84
7	Osasco, V7.1 a Rodoanel (de 23°30'39.60"S 46°48'35.56"O a 23°45'47.46"S 46°32'50.73"O)	SP-021	triplicado; quadruplicado	29	7	4	61,12	1022,96
8	Rodoanel ao Porto de Santos (de 23°45'47.46"S 46°32'50.73"O a 23°57'58.24"S 46°18'7.00"O)	SP-150; vias urbanas	duplicado; simples	5	7	3	34,56	1057,52
Total				56	31	64	1057,52	

Dados coletados em 2023 pelo Google Earth e Sentinel-2-L2A (satélite).

Tabela B2. Dados das pontes da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	2	P2.1	20	10	200	279,00	29.296,20
2	2	P2.2	80	10	800	1.116,00	117.184,80
3	2	P2.3	30	10	300	418,50	43.944,30
4	2	P2.4	10	10	100	139,50	14.648,10
5	2	P2.5	250	10	2.500	3.487,50	366.202,50
6	2	P2.6	2.550	10	25.500	35.572,50	3.735.265,50
7	3	P3.1	40	20	800	1.116,00	117.184,80
8	3	P3.2	20	20	400	558,00	58.592,40
9	4	P4.1	30	20	600	837,00	87.888,60
10	4	P4.2	30	20	600	837,00	87.888,60
11	4	P4.3	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
12	5	P5.1	190	20	3.800	5.301,00	556.627,80
13	5	P5.2	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
14	5	P5.3	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
15	5	P5.X	50	20	1.000	1.395,00	146.481,00
16	6	P6.1	40	30	1.200	1.674,00	175.777,20
17	6	P6.2	180	30	5.400	7.533,00	790.997,40
18	7	P7.01X	265	40	10.600	14.787,00	1.552.698,60
19	7	P7.02X	35	40	1.400	1.953,00	205.073,40
20	7	P7.1	202	40	202	281,79	29.589,16
21	7	P7.2	250	40	10.000	13.950,00	1.464.810,00
22	7	P7.3	90	40	3.600	5.022,00	527.331,60
23	7	P7.4	690	40	27.600	38.502,00	4.042.875,60
24	7	P7.5	1.770	40	70.800	98.766,00	10.370.854,80
25	8	P8.1	310	20	6.200	8.649,00	908.182,20
26	8	P8.1X	295	20	5.900	8.230,50	864.237,90
27	8	P8.2	30	20	600	837,00	87.888,60
28	8	P8.2X	150	20	3.000	4.185,00	439.443,00
29	8	P8.Sab	120	20	3.600	3.348,00	527.331,60
30	8	P8.3	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
31	8	P8.4	200	20	4.000	5.580,00	585.924,00
Total						271.051,29	28.637.328,46

Nom. refere-se a 'nomenclatura das pontes'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela B3. Dados dos viadutos da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m ²)	Concreto (m ³)	Aço (kg)
1	3	V3.1	40	20	800	1.116,00	117.184,80
2	3	V3.2	10	20	200	279,00	29.296,20
3	3	V3.3	90	20	1.800	2.511,00	263.665,80
4	3	V3.4	10	20	200	279,00	29.296,20
5	3	V3.5	20	20	400	558,00	58.592,40
6	4	V4.1	20	20	400	558,00	58.592,40
7	4	V4.2	10	20	200	279,00	29.296,20
8	4	V4.3	30	20	600	837,00	87.888,60
9	4	V4.4	20	20	400	558,00	58.592,40
10	4	V4.5	30	20	600	837,00	87.888,60
11	5	V5.1	20	20	400	558,00	58.592,40
12	5	V5.2	20	20	400	558,00	58.592,40
13	5	V5.3	40	20	800	1.116,00	117.184,80
14	5	V5.4	30	20	600	837,00	87.888,60
15	5	V5.5	20	20	400	558,00	58.592,40
16	5	V5.6	10	20	200	279,00	29.296,20
17	5	V5.7	30	20	600	837,00	87.888,60
18	5	V5.8	50	20	1.000	1.395,00	146.481,00
19	5	V5.9	40	20	800	1.116,00	117.184,80
20	6	V6.1	30	30	900	1.255,50	131.832,90
21	6	V6.2	20	30	600	837,00	87.888,60
22	6	V6.3	70	30	2.100	2.929,50	307.610,10
23	7	V7.1	120	20	2.400	3.348,00	351.554,40
24	7	V7.3	200	40	8.000	11.160,00	1.171.848,00
25	7	V7.4	30	40	1.200	1.674,00	175.777,20
26	7	V7.5	30	40	1.200	1.674,00	175.777,20
27	7	V7.6	60	40	2.400	3.348,00	351.554,40
28	7	V7.7	30	50	1.500	2.092,50	219.721,50
29	7	V7.10	690	40	27.600	38.502,00	4.042.875,60
30	7	V7.0.11	163	40	6.520	9.095,40	955.056,12
31	7	V7.11	30	40	1.200	1.674,00	175.777,20
32	7	V7.12	280	20	5.600	7.812,00	820.293,60
33	7	V7.14	40	20	800	1.116,00	117.184,80
34	7	V7.15	35	40	1.400	1.953,00	205.073,40
35	7	V7.15X	14	40	560	781,20	82.029,36
36	7	V7.15X1	20	20	400	558,00	58.592,40
37	7	V7.16	30	40	1.200	1.674,00	175.777,20
38	7	V7.17	40	40	1.600	2.232,00	234.369,60
39	7	V7.18	10	40	400	558,00	58.592,40
40	7	V7.19	20	40	800	1.116,00	117.184,80
41	7	V7.19X	14	40	560	781,20	82.029,36
42	7	V7.20	40	40	1.600	2.232,00	234.369,60
43	7	V7.21	160	40	6.400	8.928,00	937.478,40
44	7	V7.22	10	40	400	558,00	58.592,40
45	7	V7.24	20	40	800	1.116,00	117.184,80
46	7	V7.26	20	40	800	1.116,00	117.184,80
47	7	V7.27	20	40	800	1.116,00	117.184,80
48	7	V7.30	10	40	400	558,00	58.592,40
49	7	V7.31	10	40	400	558,00	58.592,40
50	7	V7.32	40	40	1.600	2.232,00	234.369,60
51	7	V7.33	20	40	800	1.116,00	117.184,80
52	8	V8.1	60	40	2.400	3.348,00	351.554,40
53	8	V8.4	10	40	400	558,00	58.592,40
54	8	V8.6	40	40	1.600	2.232,00	234.369,60
55	8	V8.7	20	40	800	1.116,00	117.184,80
56	8	V8.9	110	40	4.400	6.138,00	644.516,40
Total						144.159,30	15.137.346,54

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos viadutos'; Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido); Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto); Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela B4. Dados dos trevos da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	3	T.001	20	20	400	558,00	58.592,40
2	3	T.005	20	20	400	558,00	58.592,40
3	3	T.007	40	20	800	1.116,00	117.184,80
4	4	T.010	30	20	600	837,00	87.888,60
5	4	T.011	30	20	600	837,00	87.888,60
6	4	T.013	30	20	600	837,00	87.888,60
7	4	T.015	10	20	200	279,00	29.296,20
8	4	T.016	30	20	600	837,00	87.888,60
9	4	T.018	10	20	200	279,00	29.296,20
10	4	T.021	10	20	200	279,00	29.296,20
11	4	T.023	10	20	200	279,00	29.296,20
12	4	T.030	20	20	400	558,00	58.592,40
13	4	T.032	20	20	400	558,00	58.592,40
14	4	T.034	10	20	200	279,00	29.296,20
15	4	T.035	30	20	600	837,00	87.888,60
16	4	T.038	20	20	400	558,00	58.592,40
17	4	T.040	10	20	200	279,00	29.296,20
18	4	T.042	20	20	400	558,00	58.592,40
19	4	T.045	20	20	400	558,00	58.592,40
20	4	T.046	20	20	400	558,00	58.592,40
21	4	T.048	20	20	400	558,00	58.592,40
22	4	T.049	30	20	600	837,00	87.888,60
23	4	T.050	10	20	200	279,00	29.296,20
24	4	T.052	10	20	200	279,00	29.296,20
25	4	T.054	20	20	400	558,00	58.592,40
26	4	T.057	10	20	200	279,00	29.296,20
27	4	T.058	30	20	600	837,00	87.888,60
28	4	T.059	20	20	400	558,00	58.592,40
29	4	T.060	40	20	800	1.116,00	117.184,80
30	4	T.062	20	20	400	558,00	58.592,40
31	5	T.065	10	20	200	279,00	29.296,20
32	5	T.066	10	20	200	279,00	29.296,20
33	5	T.070	10	20	200	279,00	29.296,20
34	5	T.072	20	20	400	558,00	58.592,40
35	5	T.073	30	20	600	837,00	87.888,60
36	5	T.074	30	20	600	837,00	87.888,60
37	5	T.075	70	20	1.400	1.953,00	205.073,40
38	5	T.077	40	20	800	1.116,00	117.184,80
39	5	T.078	40	20	800	1.116,00	117.184,80
40	5	T.079	30	20	600	837,00	87.888,60
41	5	T.080	30	20	600	837,00	87.888,60
42	5	T.081	40	20	800	1.116,00	117.184,80
43	5	T.082	40	20	800	1.116,00	117.184,80
44	5	T.083	30	20	600	837,00	87.888,60
45	5	T.084	30	20	600	837,00	87.888,60
46	5	T.085	40	20	800	1.116,00	117.184,80
47	5	T.086	30	20	600	837,00	87.888,60
48	5	T.087	20	20	400	558,00	58.592,40
49	5	T.088	20	20	400	558,00	58.592,40
50	5	T.091	10	20	200	279,00	29.296,20
51	5	T.093	30	20	600	837,00	87.888,60
52	5	T.095	10	20	200	279,00	29.296,20
53	5	T.096	40	20	800	1.116,00	117.184,80
54	5	T.098	10	20	200	279,00	29.296,20
55	6	T.105	10	30	300	418,50	43.944,30

Cotinha...

Tabela B4 (continuação). Dados dos trevos da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
56	6	T.106	30	30	900	1.255,50	131.832,90
57	6	T.107	20	30	600	837,00	87.888,60
58	7	T.109	110	40	4.400	6.138,00	644.516,40
59	7	T.110	100	40	4.000	5.580,00	585.924,00
60	7	T.111	40	40	1.600	2.232,00	234.369,60
61	7	T.112	10	40	400	558,00	58.592,40
62	8	T.114	20	40	800	1.116,00	117.184,80
63	8	T.116	50	40	2.000	2.790,00	292.962,00
64	8	T.117	30	40	1.200	1.674,00	175.777,20
Total						58.590,00	6.152.202,00

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos trevos'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

A Tabela B5 mostra um resumo do quantitativo de concreto e aço para as obras de arte especiais (pontes, viadutos e trevos) das Tabelas B2, B3 e B4.

Tabela B5. Quantitativo de concreto e aço das obras de artes especiais para a rota rodoviária 1.

Tipo de Obra	Concreto (m³)	Aço (kg)
Pontes	271.051,29	28.637.328,46
Viadutos	144.159,30	15.137.346,54
Trevos	58.590,00	6.152.202,00
Total	473.800,59	49.926.877,00

Apêndice C. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR - 1096,44 km.

Tabela C1. Dados dos trechos, tipo de via, obras de arte especiais e extensão da rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR.

Nº	Trecho	Rodovia	Tipo	Viadutos	Pontes	Trevos	Extensão (km)	Acumulado (km)
1	Afonso Pena - saída da cidade Trevo 2 (de 20°27'53.64"S 54°37'18.30"O a 20°34'57.10"S 54°35'1.67"O)	vias urbanas	via urbana	0	1	0	14,12	14,12
2	Saída da cidade Trevo 2 a Porto Primavera (de 0°34'57.10"S 54°35'1.67"O a 22°28'54.46"S 52°57'22.86"O)	BR-163; BR-267; MS-134; MS-276; MS-480	simples	0	4	0	350,35	364,47
3	Porto Primavera a Trevo 37 (de 22°28'54.46"S 52°57'22.86"O a 23°30'36.05"S 51°43'12.94"O)	SP-613; PR-182; PR-218; via urbana; PR-317	simples; duplicado	9	3	2	232,85	597,32
4	Trevo 37 a Imbaú Trevo 43 (de 23°30'36.05"S 51°43'12.94"O a 24°26'56.41"S 50°45'35.07"O)	Contorno de Mandaguari; via urbana; BR-376; Rua Maringá	simples; duplicado	4	0	2	177,67	774,99
5	Imbaú Trevo 43 a Ponta Grossa Trevo 46 (de 24°26'56.41"S 50°45'35.07"O a 25° 4'53.82"S 50°11'28.93"O)	Rua Maringá; BR-376	simples; duplicado	5	5	3	100,6	875,59
6	Ponta Grossa Trevo 46 a Curitiba Trevo 60 (de 25° 4'53.82"S 50°11'28.93"O a 25°30'52.37"S 49° 7'47.74"O)	BR-376; via urbana	simples; duplicado	13	4	3	147,25	1022,84
7	Curitiba Trevo 60 a Porto de Paranaguá (25°30'52.37"S 49° 7'47.74"O a 25°30'12.96"S 48°31'7.69"O)	BR-277; via urbana	duplicado; via urbana	1	5	1	73,6	1096,44
Total				32	22	11	1096,44	

Dados coletados em 2023 pelo Google Earth e Sentinel-2-L2A (satélite).

Tabela C2. Dados das pontes da rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	1	P1.1	20	10	200	279,00	29.296,20
2	2	P2.1	40	10	400	558,00	58.592,40
3	2	P2.2	60	10	600	837,00	87.888,60
4	2	P2.3	40	10	400	558,00	58.592,40
5	3	P3.1	50	10	500	697,50	73.240,50
6	3	P3.2	500	10	5.000	6.975,00	732.405,00
7	3	P3.3	50	10	500	697,50	73.240,50
8	5	P5.1	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
9	5	P5.2	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
10	5	P5.3	60	20	1.200	1.674,00	175.777,20
11	5	P5.4	70	20	1.400	1.953,00	205.073,40
12	5	P5.5	120	20	2.400	3.348,00	351.554,40
13	6	P6.1	20	20	400	558,00	58.592,40
14	6	P6.2	110	20	2200	3.069,00	322.258,20
15	6	P6.X	47	20	940	1.311,30	137.692,14
16	6	P6.3	80	20	1600	2.232,00	234.369,60
17	6	P6.4	90	20	1800	2.511,00	263.665,80
18	7	P7.1	40	20	800	1.116,00	117.184,80
19	7	P7.2	40	20	800	1.116,00	117.184,80
20	7	P7.3	20	20	400	558,00	58.592,40
21	7	P7.4	10	20	200	279,00	29.296,20
22	7	P7.5	30	20	600	837,00	87.888,60
Total						34.512,30	3.623.939,94

Nom. refere-se a 'nomenclatura das pontes'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela C3. Dados dos viadutos da rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m ²)	Concreto (m ³)	Aço (kg)
1	3	V3.2	30	20	600	837,00	87.888,60
2	3	V3.3	30	20	600	837,00	87.888,60
3	3	V3.4	10	20	200	279,00	29.296,20
4	3	V3.6	20	20	400	558,00	58.592,40
5	3	V3.7	20	20	400	558,00	58.592,40
6	3	V3.8	50	20	1	1.395,00	146.481,00
7	3	V3.10	10	20	200	279,00	29.296,20
8	3	V3.12	10	20	200	279,00	29.296,20
9	3	V3.13	40	20	800	1.116,00	117.184,80
10	4	V4.1	20	20	400	558,00	58.592,40
11	4	V4.5	50	20	1	1.395,00	146.481,00
12	4	V4.6	20	20	400	558,00	58.592,40
13	4	V4.7	20	20	400	558,00	58.592,40
14	5	V5.1	30	20	600	837,00	87.888,60
15	5	V5.2	40	20	800	1.116,00	117.184,80
16	5	V5.4	40	20	800	1.116,00	117.184,80
17	5	V5.5	40	20	800	1.116,00	117.184,80
18	5	V5.6	20	20	400	558,00	58.592,40
19	6	V6.2	30	20	600	837,00	87.888,60
20	6	V6.4	20	20	400	558,00	58.592,40
21	6	V6.5	20	20	400	558,00	58.592,40
22	6	V6.9	30	20	600	837,00	87.888,60
23	6	V6.10	20	20	400	558,00	58.592,40
24	6	V6.11	60	20	1.2	1.674,00	175.777,20
25	6	V6.12	30	20	600	837,00	87.888,60
26	6	V6.14	30	20	600	837,00	87.888,60
27	6	V6.15	30	20	600	837,00	87.888,60
28	6	V6.16	40	20	800	1.116,00	117.184,80
29	6	V6.17	20	20	400	558,00	58.592,40
30	6	V6.19	10	20	200	279,00	29.296,20
31	6	V6.20	10	20	200	279,00	29.296,20
32	7	V7.1	20	30	600	837,00	87.888,60
Total						24.552,00	2.578.065,60

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos viadutos'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela C4. Dados dos trevos da rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	3	T3.20	70	20	1.4	1.953,00	205.073,40
2	3	T3.22	40	20	800	1.116,00	117.184,80
3	4	T4.41	60	20	1.2	1.674,00	175.777,20
4	4	T4.42	30	20	600	837,00	87.888,60
5	5	T5.43	70	20	1.4	1.953,00	205.073,40
6	5	T5.44	30	20	600	837,00	87.888,60
7	5	T5.45	40	20	800	1.116,00	117.184,80
8	6	T6.51	20	20	400	558,00	58.592,40
9	6	T6.55	40	20	800	1.116,00	117.184,80
10	6	T6.59	90	20	1.8	2.511,00	263.665,80
11	7	T7.60	120	20	2.4	3.348,00	351.554,40
Total						17.019,00	1.787.068,20

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos trevos'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

A Tabela C5 mostra um resumo do quantitativo de concreto e aço para as obras de arte especiais (pontes, viadutos e trevos) das Tabelas C2, C3 e C4.

Tabela C5. Quantitativo de concreto e aço das obras de artes especiais para a rota rodoviária 2.

Tipo de obra	Concreto (m³)	Aço (kg)
Pontes	34.512,30	3.623.939,94
Viadutos	24.552,00	2.578.065,60
Trevos	17.019,00	1.787.068,20
Total	76.083,30	7.989.073,74

Apêndice D. Quantitativos das obras de arte especiais (viadutos, pontes e trevos) da rota rodoviária 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile - 2465,04 km.

Tabela D1. Dados dos trechos, tipo de via, obras de arte especiais e extensão da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Etapa	Trecho	Rodovia	Tipo	Viadutos	Pontes	Trevos	Extensão (km)	Acumulado (km)
1	Trevo 1 - saída a Sidrolândia Trevo 2 (de 20°33'5.68"S 54°40'5.29"O a 20°54'2.29"S 54°55'32.34"O)	BR-060	simples	1	2	1	52,4	52,4
2	Sidrolândia Trevo 2 a Jardim Trevo 7 (de 20°54'2.29"S 54°55'32.34"O a 21°28'59.01"S 56° 8'43.14"O)	BR-060; via urbana	simples	0	4	5	171	223,4
3	Jardim Trevo 7 a Cruzamento MS474 (de 21°28'59.01"S 56° 8'43.14"O a 21°44'54.75"S 56°55'18.58"O)	via urbana; BR-267	simples	0	3	2	94,15	317,55
4	Cruzamento MS474 a Porto Murtinho Dique (de 21°44'54.75"S 56°55'18.58"O a 21°41'41.35"S 57°53'9.02"O)	BR-267	simples	0	1	3	109,02	426,57
5	Porto Murtinho Dique a Ponte Rio Paraguai - contorno viário (de 21°41'41.35"S 57°53'9.02"O a 21°42'18.90"S 21°42'18.90"S)	via urbana	simples	0	0	0	13,1	439,67
6	Ponte Rio Paraguai a Fim da Ponte (de 21°42'18.90"S 21°42'18.90"S a 21°41'28.68"S 57°53'50.96"O)	ponte	simples	0	1	0	1,29	440,96
7	Fim da Ponte a Puerto Carmelo Peralta (21°41'28.68"S 57°53'50.96"O a 21°40'32.31"S 57°54'47.18"O)	via urbana	simples	0	0	0	2,76	443,72
8	Puerto Carmelo Peralta a Cruce Carmelo Peralta (21°40'32.31"S 57°54'47.18"O a 21°41'27.03"S 58°29'54.67"O)	via urbana; PY 15	simples	0	5	1	63,3	507,02
9	Cruce Carmelo Peralta a T4 (21°41'27.03"S 58°29'54.67"O a 22°18'35.64"S 59°34'15.28"O)	Cruce Carmelo Peralta; Zona Centinela	simples	0	4	3	131,34	638,36

Continua...

Tabela D1 (continuação). Dados dos trechos, tipo de via, obras de arte especiais e extensão da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Etapa	Trecho	Rodovia	Tipo	Viadutos	Pontes	Trevos	Extensão (km)	Acumulado (km)
10	T4 a Mariscal José Félix Estigarribia (22°18'35.64"S 59°34'15.28"O a 22°2'1.49"S 60°35'48.26"O)	Line Sul; Ruta Transchaco	simples	0	0	3	142,79	781,15
11	Mariscal José Félix Estigarribia a P11 (22°2'1.49"S 60°35'48.26"O a 22°22'44.55"S 62°31'7.94"O)	Zona Rosaleda; Cruce Ben Silvio - Via urbana.	simples	0	1	0	220,16	1001,31
12	P11 a RN34 (22°22'44.55"S 62°31'7.94"O a 22°10'53.80"S 63°42'57.86"O)	RP 54	simples	0	1	0	149,6	1150,91
13	RN34 a Pozo Hondo (22°10'53.80"S 63°42'57.86"O a 23°18'27.54"S 64°12'53.20"O)	RN 34	simples	0	11	4	143,28	1294,19
14	Pozo Hondo a San Pedro de Jujuy (23°18'27.54"S 64°12'53.20"O a 24°12'40.59"S 64°51'24.81"O)	RN 34	simples	0	9	3	135,23	1429,42
15	San Pedro de Jujuy a T19 (24°12'40.59"S 64°51'24.81"O a 24°22'10.70"S 64°58'24.50"O)	RN 34	simples	1	1	3	28,69	1458,11
16	T19 a San Salvador de Jujuy (24°22'10.70"S 64°58'24.50"O a 24°11'17.63"S 65°19'15.57"O)	RN 66	simples	3	1	5	48,27	1506,38
17	San Salvador de Jujuy a San Pedro de Atacama (24°11'30.14"S 65°19'10.65"O a 22°54'50.28"S 68°11'30.54"O)	RP 9; RN 52; R-27	duplicada na RP9; simples	1	12	2	475,12	1981,5
18	San Pedro de Atacama a Calama (22°54'50.28"S 68°11'30.54"O a 22°26'35.62"S 68°54'6.05"O)	R-23	simples	0	2	3	99,68	2081,18
19	Calama a Iquique (22°26'35.62"S 68°54'6.05"O a 20°15'20.64"S 70° 8'2.32"O)	R-23; R-24; R-5; R-16	simples; duplicada na Ruta 16	5	4	5	383,86	2465,04
Total				11	62	43	2465,04	

Dados coletados em 2023 pelo Google Earth e Sentinel-2-L2A (satélite).

Tabela D2. Dados das pontes da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largu- ra	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	1	P1.1	10	10	100	139,50	14.648,10
2	1	P1.2	20	10	200	279,00	29.296,20
3	2	P2.1	30	10	300	418,50	43.944,30
4	2	P2.2	60	10	600	837,00	87.888,60
5	2	P2.3	40	10	400	558,00	58.592,40
6	2	P2.4	80	10	800	1.116,00	117.184,80
7	3	P3.1	50	10	500	697,50	73.240,50
8	3	P3.2	40	10	400	558,00	58.592,40
9	3	P3.3	40	10	400	558,00	58.592,40
10	4	P4.1	90	10	900	1.255,50	131.832,90
11	6	P6.1	1.294	20	25.880	36.102,60	3.790.928,28
12	8	P8.1	30	10	300	418,50	43.944,30
13	8	P8.2	40	10	400	558,00	58.592,40
14	8	P8.3	40	10	400	558,00	58.592,40
15	8	P8.4	50	10	500	697,50	73.240,50
16	8	P8.5	50	10	500	697,50	73.240,50
17	9	P9.1	80	10	800	1.116,00	117.184,80
18	9	P9.2	30	10	300	418,50	43.944,30
19	9	P9.3	100	10	1000	1.395,00	146.481,00
20	9	P9.4	40	10	400	558,00	58.592,40
21	11	P11.1	200	10	2000	2.790,00	292.962,00
22	12	P12.1	80	10	800	1.116,00	117.184,80
23	13	P13.1	50	10	500	697,50	73.240,50
24	13	P13.2	20	10	200	279,00	29.296,20
25	13	P13.3	50	10	500	697,50	73.240,50
26	13	P13.4	30	10	300	418,50	43.944,30
27	13	P13.5	20	10	200	279,00	29.296,20
28	13	P13.6	30	10	300	418,50	43.944,30
29	13	P13.7	100	10	1000	1.395,00	146.481,00
30	13	P13.8	20	10	200	279,00	29.296,20
31	13	P13.9	110	10	1100	1.534,50	161.129,10
32	13	P13.10	30	10	300	418,50	43.944,30
33	13	P13.11	210	10	2100	2.929,50	307.610,10
34	14	P14.1	40	10	400	558,00	58.592,40
35	14	P14.2	90	10	900	1.255,50	131.832,90
36	14	P14.3	230	10	2300	3.208,50	336.906,30
37	14	P14.4	30	10	300	418,50	43.944,30
38	14	P14.5	70	10	700	976,50	102.536,70
39	14	P14.6	70	10	700	976,50	102.536,70
40	14	P14.7	500	10	5000	6.975,00	732.405,00
41	14	P14.8	500	10	5000	6.975,00	732.405,00
42	14	P14.9	200	10	2000	2.790,00	292.962,00
43	15	P15.1	400	10	4000	5.580,00	585.924,00
44	16	P16.1	100	10	1000	1.395,00	146.481,00
45	17	P17.1	50	10	500	697,50	73.240,50
46	17	P17.2	30	10	300	418,50	43.944,30
47	17	P17.3	80	10	800	1.116,00	117.184,80
48	17	P17.4	60	10	600	837,00	87.888,60
49	17	P17.5	30	10	300	418,50	43.944,30
50	17	P17.6	200	10	2000	2.790,00	292.962,00
51	17	P17.7	30	10	300	418,50	43.944,30
52	17	P17.8	50	10	500	697,50	73.240,50
53	17	P17.9	40	10	400	558,00	58.592,40
54	17	P17.10	20	10	200	279,00	29.296,20
55	17	P17.11	20	10	200	279,00	29.296,20

Continua...

Tabela D2 (continuação). Dados das pontes da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Item	Trecho	Nom.	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
56	17	P17.12	20	10	200	279,00	29.296,20
57	18	P18.1	50	10	500	697,50	73.240,50
58	18	P18.2	30	10	300	418,50	43.944,30
59	19	P19.1	50	10	500	697,50	73.240,50
60	19	P19.2	50	10	500	697,50	73.240,50
61	19	P19.3	50	10	500	697,50	73.240,50
62	19	P19.4	40	10	400	558,00	58.592,40
Total						105.852,6	11.114.978,28

Nom. refere-se a 'nomenclatura das pontes'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela D3. Dados dos viadutos da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Item	Trecho	N	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	1	V1.1	10	10	100	139,50	14.648,10
2	15	V15.1	40	10	400	558,00	58.592,40
3	16	V16.2	20	10	200	279,00	29.296,20
4	16	V16.3	100	10	1.000	1.395,00	146.481,00
5	16	V16.4	30	10	300	418,50	43.944,30
6	17	V17.5	20	10	200	279,00	29.296,20
7	19	V19.6	40	10	400	558,00	58.592,40
8	19	V19.7	20	10	200	279,00	29.296,20
9	19	V19.8	10	10	100	139,50	14.648,10
10	19	V19.9	20	10	200	279,00	29.296,20
11	19	V19.10	20	10	200	279,00	29.296,20
Total						4.603,50	483.387,30

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos viadutos'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

Tabela D4. Dados dos trevos da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile.

Item	Trecho	N	Comprimento	Largura	Área (m²)	Concreto (m³)	Aço (kg)
1	16	T19	150	10	1.500	2.092,50	219.721,50
2	16	T20	90	10	900	1.255,50	131.832,90
3	16	T21	200	10	2.000	2.790,00	292.962,00
4	16	T22	40	10	400	558,00	58.592,40
5	16	T23	100	10	1.000	1.395,00	146.481,00
6	17	T24	20	10	200	279,00	29.296,20
7	17	T25	40	10	400	558,00	58.592,40
8	18	T26	20	10	200	279,00	29.296,20
9	18	T27	40	10	400	558,00	58.592,40
10	18	T28	30	10	300	418,50	43.944,30
11	19	T26	200	10	2.000	2.790,00	292.962,00
12	19	T27	100	10	1.000	1.395,00	146.481,00
13	19	T28	90	10	900	1.255,50	131.832,90
14	19	T29	20	10	200	279,00	29.296,20
15	19	T30	50	10	500	697,50	73.240,50
Total						16.600,50	1.743.123,90

Nom. refere-se a 'nomenclatura dos trevos'.

Largura: 10m (2 faixas); 20m ou mais (pista dupla, com 2 até 4 faixas em cada sentido).

Taxa de concreto (m³/m²): 1,395 (Equação 5, para cálculo do volume do concreto).

Taxa de armadura-aço (kg/m²): 146,48 (Equação 6, para cálculo do kg do aço).

A Tabela D5 mostra um resumo do quantitativo de concreto e aço para as obras de arte especiais (pontes, viadutos e trevos) das Tabelas D2, D3 e D4.

Tabela D5. Quantitativo de concreto e aço das obras de artes especiais para a rota rodoviária 3.

Tipo de obra	Concreto (m³)	Aço (kg)
Pontes	105.852,60	11.114.978,28
Viadutos	4.603,50	483.387,30
Trevos	16.600,50	1.743.123,90
Total	127.056,60	13.341.489,48

Tabela D6. Nomes das rodovias e siglas para as três rotas rodoviárias.

Item*	Sigla	Nome	País
1	BR-060	Rodovia Federal	Brasil
2	BR-163	Rodovia da Integração	Brasil
3	BR-267	Rodovia Federal	Brasil
4	BR-277	Rodovia da Integração Sul	Brasil
5	BR-376	Rodovia do Café	Brasil
6	MS-038	Rodovia Senador Filinto Müller	Brasil
7	MS-040	Rodovia Senador Ramez Tebet	Brasil
8	MS-134	Rodovia Irmãos Peci	Brasil
9	MS-267	Rodovia Senador Roberto Rollemberg	Brasil
10	MS-276	Rodovia Valério de Almeida	Brasil
11	MS-480	Rodovia Prefeito Hermenegildo Alves de Brito	Brasil
12	PR-182	Rodovia João Alves de Queiroz	Brasil
13	PR-218	Rodovia Pedro Taques	Brasil
14	PR-317	Rodovia Francisco Alves Negrão	Brasil
15	SP-021	Rodovia do Rodoanel Mário Covas	Brasil
16	SP-150	Rodovia Anchieta	Brasil
17	SP-225	Rodovia João Baptista Cabral Rennó	Brasil
18	SP-270	Rodovia Raposo Tavares	Brasil
19	SP-280	Rodovia Presidente Castelo Branco	Brasil
20	SP-327	Rodovia Orlando Quagliato	Brasil
21	SP-613	Rodovia Nestor Fernandes	Brasil
22	PY 15	Ruta 15	Paraguai
23	RN 34	Ruta Nacional 34	Argentina
24	RN 52	Ruta Nacional 52	Argentina
25	RN 66	Ruta Nacional 66	Argentina
26	RP 9	Ruta Provincial 9	Argentina
27	RP 54	Ruta Provincial 54	Argentina
28	R-5	Ruta 5	Chile
29	R-16	Ruta 16	Chile
30	R-23	Ruta 23	Chile
31	R-24	Ruta 24	Chile
32	R-27	Ruta 27	Chile

(*) Itens 1 a 5: Rodovias Federais - Brasil;
 itens 6 a 11: Rodovias Estaduais - Mato Grosso do Sul;
 itens 12 a 14: Rodovias Estaduais - Paraná;
 itens 15 a 21: Rodovias Estaduais - São Paulo.

Apêndice E. Inventário de dados para a infraestrutura das rodovias: rotas 1, 2 e 3.

Neste Apêndice são apresentadas as bases de cálculo para determinar a quantidade de materiais usados na infraestrutura das rodovias considerando uma seção-tipo de 1.000 m.

Materiais de infraestrutura da rota 1: Tabelas E4 e E5.

Materiais de infraestrutura da rota 2: Tabelas E6 e E7.

Materiais de infraestrutura da rota 3: Tabelas E8 e E9.

Tabela E1. Medidas para cálculo das rodovias: seção-tipo.

N.	Descrição	Valor
#1	Seção-tipo	1000m
#2	Faixa de rolamento (largura)	3,5m
#3	CBUQ (espessura da camada)	0,05m
#4	Capa base (espessura da camada)	0,2m
#5	Capa sub-base (espessura da camada)	0,2m
#6	Acostamento (espessura da camada)	0,03m
#7	CBUQ (densidade) (ρ)	2,394 ton./m ³
#8	Cascalho (densidade) (ρ)	1,84 ton./m ³
#9	Taxa de concreto	1,395 m ³ /m ²
#10	Taxa de armadura	146,481 kg/m ²
#11	Imprimação - CM-30 (cobertura)	1,2l/m ²
#12	Acostamento (largura): MS, PR	1m
#13	Acostamento (largura): SP	1,5m
#14	Acostamento (largura): AR, CL, PY	2,5m

MS, Mato Grosso do Sul; PR, Paraná; SP, São Paulo; AR, Argentina; CL, Chile; PY, Paraguai.

Tabela E2. Fatores para uma seção-tipo de 1000 m.

Item	Pista 2 faixas	Pista 4 faixas	Pista 6 faixas	Pista 8 faixas	Acostamento 1m, simples	Acostamento 1,5m, simples	Acostamento 1m, duplo	Acostamento 1,5m, duplo	Acostamento 2,5m, simples
CBUQ (ton.):	837,90	1.675,80	2.513,70	3.351,60	143,64	215,46	287,28	430,92	359,1
Brita (83,38%)	698,64	1.397,28	2.095,92	2.794,56	119,77	179,65	239,53	359,30	299,42
Areia (9,48%)	79,43	158,87	238,30	317,73	13,62	20,43	27,23	40,85	34,04
Filler (1,90%)	15,92	31,84	47,76	63,68	2,73	4,09	5,46	8,19	6,82
CAP-50/70 (5,25%)	43,99	87,98	131,97	175,96	7,54	11,31	15,08	22,62	18,85
Imprimação CM-30 (l/km):	8.400	16.800	25.200	33.600	2.400	3.600	4.800	7.200	6.000
Capa base									
Cascalho (ton.)	2.576	5.152	7.728	10.304	/	/	/	/	/
Água (ton.)	180,32	360,64	540,96	721,28	/	/	/	/	/
Capa sub-base									
Cascalho (ton.)	2.576	5.152	7.728	10.304	/	/	/	/	/
Água (ton.)	180,32	360,64	540,96	721,28	/	/	/	/	/

Tabela E3. Pontes de Concreto Armado (PCA).

Item	Projeto	Dimensões (m)		Área	Quantidade		Fundação	taxa de armadura	taxa de concreto
		comprimento	largura	m²	concreto (m³)	aço (kg)		kg/m² do aço	m³/m²
1	Agesul	50,00	4,5	225,00	233,07	24.370,90	Sapata de concreto	108,32	1,036
2	Agesul	39,60	10,0	396,00	335,53	54.782,00	Sapata de concreto	138,34	0,847
3	Agesul	78,00	6,0	468,00	1.809,10	61.830,05	Estaca escavada e bloco	132,12	3,866
4	Agesul	89,20	6,0	535,20	433,76	60.699,00	Estaca raiz	113,41	0,810
5	Agesul	25,00	6,0	150,00	154,66	37.095,05	Estaca trilho TR-68	247,30	1,031
6	Sinfra	40,90	8,8	359,92	350,97	55.837,20	Estaca raiz	155,14	0,975
7	Sinfra	45,55	8,8	400,84	482,21	52.407,90	Tubulão a ar-comprimido	130,75	1,203
Média								146,48	1,395

Os valores utilizados têm como base os quantitativos dos projetos executivos das obras de construção de pontes de concreto armado em andamento, sob responsabilidade da Agesul/MS e da Sinfra/MT.

Cada projeto executivo apresenta uma solução única, adaptada às especificidades do local de execução. Para simplificar, foram adotados valores médios calculados (média simples), referentes à taxa de armadura e taxa de concreto, que estão demonstrados.

Dos sete projetos selecionados, foram identificados cinco tipos de fundação. As taxas de armadura e de concreto foram aplicadas nos cálculos dos tabuleiros* das pontes, viadutos e trevos.

* Tabuleiros: parte superior da estrutura onde se localiza a superfície de circulação, seja para veículos, pedestres ou trilhos de trem (serve como uma plataforma de apoio que distribui as cargas do tráfego para as outras partes da ponte, como as vigas e os pilares).

Infraestrutura da rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP - 1057,52 km.

Tabela E4. Rota 1: Cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 1 por trechos.

Trechos		1	2	3	4	5	6	7	8	Total
N.	Item									
#1	CBUQ (ton):	16.536,08	318.600,70	120.595,36	467.749,30	591.883,94	172.798,92	194.461,51	71.993,80	1.954.619,61
#2	Brita (ton)	13.786,13	265.617,41	100.540,35	389.962,59	493.453,64	144.062,46	162.122,56	60.021,23	1.629.566,36
#3	Areia (ton)	1.567,62	30.203,35	11.432,44	44.342,63	56.110,60	16.381,34	18.434,95	6.825,01	185.297,94
#4	Filler (ton)	314,19	6.053,41	2.291,31	8.887,24	11.245,79	3.283,18	3.694,77	1.367,88	37.137,77
#5	CAP-50/70 (ton)	868,14	16.726,54	6.331,26	24.556,84	31.073,91	9.071,94	10.209,23	3.779,67	102.617,53
#6	Capa-base Cascalho (ton)	86.708,16	1.659.459,20	584.752,00	2.275.638,40	2.874.094,72	896.448,00	340.539,32	673.263,36	9.390.903,16
#7	Capa base Água (ton)	6.069,57	116.162,14	40.932,64	159.294,69	201.186,63	62.751,36	23.837,76	47.128,44	657.363,23
#8	Imprimação CM-30 (l)	181.932,00	3.503.208,00	1.372.416,00	5.325.264,00	6.736.992,00	1.899.360,00	2.111.172,00	815.832,00	21.946.176,00

Tabela E5. Memorial de cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 1.

Item	Descrição
	As rotas foram divididas em trechos, determinados pela região (MS e SP)*, ou identificação da rodovia (estadual ou federal), ou o número de faixas de rolamento, ou características topográficas.
	A Rota 1 (Campo Grande - Santos) foi dividida em 8 trechos, com os seguintes intervalos: trecho 1 (16,85 km), trecho 2 (325,02 km), trecho 3 (57,37 km), trecho 4 (222,33 km), trecho 5 (281,47 km), trecho 6 (58,80 km), trecho 7 (61,12 km), trecho 8 (34,56 km).
#1	No primeiro item tem-se o valor do Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ; nos itens de #2 a #5 são constatados os materiais que compõem o CBUQ, nas respectivas cotas.
#6	Tem-se a soma do cascalho utilizado nas camadas de capa base e capa sub-base, pois ambas têm a mesma espessura: 0,20 m.
	A Rota 1 tem 15,96 km de pontes, viadutos e trevos, onde não se aplicam as camadas base e sub-base.
#7	As mesmas observações do item #6 se aplicam à utilização da água

(*) MS, Mato Grosso do Sul; SP, São Paulo.

Infraestrutura da rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR - 1096,44 km.

Tabela E6. Rota 2: Cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 2 por trechos.

Trechos		1	2	3A	3B	4	5	6	7	Total
N.	Item									
#1	CBUQ (ton):	13.856,47	343.862,43	11.576,19	364.585,61	348.691,37	197.135,37	288.618,25	144.356,28	1.712.681,96
#2	Brita (ton):	11.552,14	286.678,11	9.651,07	303.955,02	290.703,99	164.351,75	240.621,03	120.349,83	1.427.862,95
#3	Areia (ton):	1.313,59	32.598,16	1.097,42	34.562,72	33.055,94	18.688,43	27.361,01	13.684,98	162.362,25
#4	Filler (ton):	263,27	6.533,39	219,95	6.927,13	6.625,14	3.745,57	5.483,75	2.742,77	32.540,96
#5	CAP-50/70 (ton):	727,46	18.052,78	607,75	19.140,74	18.306,30	10.349,61	15.152,46	7.578,70	89.915,80
#6	Capa-base, Cascalho (ton):	72.643,20	1.804.281,92	112.828,80	2.674.557,76	2.741.276,16	1.536.017,28	2.251.939,20	1.130.760,96	12.324.305,28
#7	Capa-base, Água (ton):	5.085,02	126.299,73	7.898,02	187.219,04	191.889,33	107.521,21	157.635,74	79.153,27	862.701,37
#8	Imprimação CM-30 (l):	152.448,00	3.783.444,00	131.820,00	4.010.136,00	3.836.184,00	2.167.104,00	3.173.160,00	1.587.648,00	18.841.944,00

Tabela E7. Memorial de cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 2.

Item	Memorial de cálculo: Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR)
	As rotas foram divididas em trechos, determinados pela região (MS, SP e PR)*, ou identificação da rodovia (estadual ou federal), ou o número de faixas de rolamento, ou características topográficas.
	A Rota 2 (Campo Grande - Porto de Paranaguá) foi dividida em 8 trechos, com os seguintes intervalos: trecho 1 (14,12 km), trecho 2 (350,35 km), trecho 3A (11 km), trecho 3B (221,85 km), trecho 4 (177,67 km), trecho 5 (100,60 km), trecho 6 (147,25 km), trecho 7 (73,60 km).
#1	No primeiro item tem-se o valor do Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ; nos itens de #2 a #5 são constatados os materiais que compõe o CBUQ, nas respectivas cotas.
#6	Este item apresenta a soma do cascalho utilizado nas camadas de capa base e capa sub-base, pois ambas têm a mesma espessura: 0,20 m.
	A Rota 2 tem 4,78 km de pontes, viadutos e trevos, onde não se aplicam as camadas base e sub-base.
#7	As mesmas observações do item #6 se aplicam à utilização da água

* MS, Mato Grosso do Sul; SP, São Paulo; PR, Paraná.

Infraestrutura da rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile - 2465,04 km.

Tabela E8. Rota 3: Cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 3 por trechos.

Trechos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N.	Item											
#1	CBUQ (ton):	51.426,95	167.813,18	92.393,32	106.994,56	12.858,17	1.080,89	3.296,54	75.694,69	157.124,21	170.919,63	263.459,70
#2	Brita (ton)	42.874,65	139.905,84	77.028,31	89.201,37	10.721,15	901,25	2.748,32	63.106,66	130.994,45	142.495,70	219.646,35
#3	Areia (ton)	4.875,27	15.908,69	8.758,89	10.143,08	1.218,95	102,47	312,51	7.175,86	14.895,37	16.203,18	24.975,98
#4	Filler (ton)	977,11	3.188,45	1.755,47	2.032,90	244,31	20,54	62,63	1.438,20	2.985,36	3.247,47	5.005,73
#5	CAP50/70 (ton)	2.699,91	8.810,19	4.850,65	5.617,21	675,05	56,75	173,07	3.973,97	8.249,02	8.973,28	13.831,63
#6	Capa base, Cascalho (ton):	269.758,72	879.910,08	484.391,04	561.207,36	67.491,20	-	14.116,48	325.039,68	675.375,68	735.654,08	1.133.233,92
#7	Capa base, Água (ton):	18.883,11	61.593,71	33.907,37	39.284,52	4.724,38	-	988,15	22.752,78	47.276,30	51.495,79	79.326,37
#8	Imprimação CM- 30 (l):	565.824,00	1.846.296	1.016.508,00	1.177.200	220.08	15.12	39.624	910.26	1.889.796	2.056.176	3.169.104,00

Continua...

Tabela E8 (continuação). Cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 3 por trechos.

Trechos		12	13	14	15	16	17	18	19	Total
N.	Item									
#1	CBUQ (ton):	179.042,47	171.265,56	161.249,07	34.183,93	57.481,14	568.463,68	166.901,30	642.635,78	3.084.284,76
#2	Brita (ton)	149.267,71	142.784,10	134.433,35	28.499,14	47.922,02	473.928,17	139.145,61	535.765,45	2.571.369,60
#3	Areia (ton)	16.973,23	16.235,98	15.286,41	3.240,64	5.449,21	53.890,36	15.822,24	60.921,87	292.390,20
#4	Filler (ton)	3.401,81	3.254,05	3.063,73	649,49	1.092,14	10.800,81	3.171,12	12.210,08	58.601,41
#5	CAP-50/70 (ton)	9.399,73	8.991,44	8.465,58	1.794,66	3.017,76	29.844,34	8.762,32	33.738,38	161.924,95
#6	Capa base, Cascalho (ton):	770.327,04	734.726,72	687.792,00	145.544,00	244.410,88	2.444.160,32	512.675,52	1.973.731,20	12.659.545,92
#7	Capa base, Água (ton):	53.922,89	51.430,87	48.145,44	10.188,08	17.108,76	171.091,22	35.887,29	138.161,18	886.168,21
#8	Imprimação CM- 30 (l):	2.153.760,00	2.059.212,00	1.936.932,00	410.496,00	690.108,00	6.837.468,00	1.434.372,00	5.523.024,00	33.951.360,00

Tabela E9. Memorial de cálculo dos materiais de infraestrutura da rota 3.

Item	Memorial de cálculo: Rota 3
	As rotas foram divididas em trechos, determinados pela região (MS, PY, AR e CL) ¹ ou identificação da rodovia (estadual ou federal), ou o número de faixas de rolamento, ou características topográficas.
	A Rota 3 (Campo Grande - Porto de Iquique/Chile) foi dividida em 19 trechos: trecho 1 (52,4 km), trecho 2 (171 km), trecho 3 (94,15 km), trecho 4 (109,02 km), trecho 5 (13,1 km), trecho 6 (1,29 km), trecho 7 (2,76 km), trecho 8 (63,3 km), trecho 9 (131,34 km), trecho 10 (142,79 km), trecho 11 (220,16 km), trecho 12 (149,6 km), trecho 13 (143,28 km), trecho 14 (135,23 km), trecho 15 (28,69 km), trecho 16 (48,27 km), trecho 17 (475,12 km), trecho 18 (99,68 km), trecho 19 (383,86 km).
	O trecho 5 (13,1 km) refere-se à alça de acesso rodoviário da entrada de Porto Murtinho até a ponte bi-nacional (Brasil-Paraguai).
	O trecho 6 (1,29 km) refere-se à ponte entre o Brasil e Paraguai, via a cidade de Porto Murtinho (MS), não se aplicando os materiais das camadas de base e sub-base.
#1	No primeiro item tem-se o valor do Concreto Betuminoso Usinado a Quente-CBUQ; nos itens de #2 a #5 são constatados os materiais que compõe o CBUQ, nas respectivas cotas.
#6	Este item apresenta a soma do cascalho utilizado nas camadas de capa base e capa sub-base, pois ambas têm a mesma espessura: 0,20 m.
#7	A Rota 3 tem 7,81 km de pontes, viadutos e trevos, onde não se aplicam as camadas base e sub-base.
	As mesmas observações do item #6 se aplicam à utilização da água

¹MS, Mato Grosso do Sul; PY, Paraguai; AR, Argentina; CL, Chile.

Apêndice F. Cálculos das horas de trabalho de pessoas e máquinas.

Tabela F1. Características dos maquinários para pavimentação de rodovias.

Item	Código	Descrição	Peso (kg)	Vida útil (ano)	HTA (h/ano)	Potência (kW)	Coefficiente de combustível (l/kWh) ¹	Combustível	Referência
1	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10m ³	23.000,00	6	2.000,00	210,00	0,18	Diesel	Atron 2729 (chassi) - Mercedes-Benz / standard 10 m ³ (carroceria) - Rossetti
2	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	49.000,00	7	2.000,00	260,00	Elétrico	Elétrico	UAB 18E Advanced - Ciber
3	E9792	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	10.800,00	6	2.000,00	85,00	0,18	Diesel	CP 274 - Dynapac
4	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	23.000,00	7	2.000,00	188,00	0,18	Diesel	Atego 2426 (chassi) - Mercedes-Benz / tanque irrigador pipa 10.000 l (tanque) - Facchini
5	E9524	Motoniveladora - 93 kW	13.032,00	7	2.000,00	93,00	0,18	Diesel	120k - Caterpillar
6	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteira com caçamba com capacidade de 1,5 m ³ - 110 kW	24.000,00	5	2.000,00	110,00	0,18	Diesel	323 D L - Caterpillar
7	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	13.500,00	7	2.000,00	82,00	0,18	Diesel	VDA 621 - Bomag Marini
8	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	13.050,00	6	2.000,00	82,00	0,18	Diesel	CA 250 D - Atlas Copco - Dynapac
9	E9530	Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 11 t - 97 kW	10.840,00	6	2.000,00	97,00	0,18	Diesel	CS533 E - Caterpillar
10	E9577	Trator agrícola - 77 kW	5.775,00	6	2.000,00	77,00	0,18	Diesel	MF 4292 - Massey Ferguson
11	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	16.000,00	7	2.000,00	136,00	0,18	Diesel	Atego 1719 (chassi) - Mercedes-Benz / HE-C 6.000 l (espargidor-tanque) - Terex-Bomag Marini/ Romanelli
12	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m ³ - 106 kW	9.991,00	5	2.000,00	106,00	0,18	Diesel	W 20E (carregadeira) / SAE 1,53 m ³ (caçamba) - Case Construction
13	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 188 kW	48.500,00	7	2.000,00	188,00	0,18	Diesel	Atego 2426 (chassi) - Mercedes-Benz / semirreboque silo com 3 eixos 30 m ³ - (Randon)

Fonte: Manual de Custo de Infraestrutura de Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT. v. 3. Equipamentos. 1a. ed. Brasília, 2017. ¹consumo de combustível: estão inclusos os lubrificantes das peças, pistão hidráulico, comandos hidráulicos e o consumo do motor.

Tabela F2. Quantidade operativa (h/t) por equipamento e por mão de obra para uma seção tipo de 1000m.

Item	Código ¹	Descrição	Unidade	Classe	Quantidade operativa ² / tipo de pista			
					simples	dupla	tripla	quádrupla
1	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kw	horas	Equipamento	58,65	117,31	175,96	234,61
2	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	horas	Equipamento	8,58	17,16	25,74	34,32
3	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	horas	Equipamento	19,98	39,97	59,95	79,94
4	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	horas	Equipamento	15,40	30,81	46,21	61,61
5	E9524	Motoniveladora - 93 kw	horas	Equipamento	18,56	37,12	55,67	74,23
6	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kw	horas	Equipamento	11,37	22,75	34,12	45,50
7	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	horas	Equipamento	8,41	16,83	25,24	33,65
8	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kw	horas	Equipamento	14,57	29,14	43,70	58,27
9	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kw	horas	Equipamento	6,90	13,80	20,70	27,59
10	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kw	horas	Equipamento	11,51	23,01	34,52	46,02
11	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kw/136 kw	horas	Equipamento	6,22	12,44	18,67	24,89
12	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	horas	Equipamento	6,86	13,73	20,59	27,46
13	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	horas	Equipamento	1,85	3,70	5,55	7,40
14	P9824	Servente	horas	Mão de obra	144,00	288,00	432,00	576,01
15	P9845	Operador de Equipamento pesado	horas	Mão de obra	123,23	246,46	369,69	492,92
16	P9866	Motorista de caminhão	horas	Mão de obra	82,13	164,25	246,38	328,51

¹ Código SICRO;² h/t=quantidade operativa; cálculo das horas de trabalho de mão de obra, realizado por um engenheiro civil da Agesul/MS.

Apêndice G. Inventário de dados da etapa de construção das rotas rodoviárias estudadas.

Neste Apêndice são os inventários de dados para cada uma das rotas rodoviárias.

A Tabela G1 mostra o inventário final para a rota 1, considerando a sua construção, quantitativos por ano e por unidade funcional. As Tabelas G2, G3 e G4 servem como suporte para a elaboração do inventário da Tabela G1.

Tabela G1. Inventário da Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP).

Tabela 01: Inventário da Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP).				
Item	Unidade	Rota 1		
		Total da rota ¹	unidade/ ano ²	unidade/ ton.carne na China
Fase construção - sistema rodoviário				
Aço	kg	5,14E+07	2,74E+06	3,17E+00
Aço (pontes, viadutos e trevos)	kg	4,99E+07	2,50E+06	2,89E+00
Aço (equipamentos) ³	kg	1,53E+06	2,42E+05	2,81E-01
Concreto	m³	4,74E+05	2,37E+04	2,75E-02
Diesel	l	1,06E+07	5,30E+05	6,15E-01
Brita	ton	1,63E+06	8,15E+04	9,45E-02
Areia	ton	1,85E+05	9,25E+03	1,07E-02
Filler	ton	3,71E+04	1,86E+03	2,15E-03
Cimento	ton	1,03E+05	5,15E+03	5,97E-03
Cascalho	ton	9,39E+06	4,70E+05	5,44E-01
Água	ton	6,57E+05	3,29E+04	3,81E-02
CM-30	l	2,19E+07	1,10E+06	1,27E+00
Mão de obra	pessoas	1,10E+02	1,10E+02	1,28E-04

¹ Quantidade total de equipamentos, materiais e mão de obra para a construção da ROTA 1. ² valores anuais: dados gerais da construção divididos pela vida útil da rodovia (apenas para materiais); o aço dos equipamentos foi calculado com base na vida útil dos veículos usados na construção da rodovia. Vida útil considerada para a rodovia: 20 anos (informação coletada em reunião com engenheiros de rodovias). ³Aço dos equipamentos: ver Tabela G2.
Rota 1: 1057,52 km - 176,25 km/ano - 6 anos (tempo de construção).

Tabela G2. Inventário dos equipamentos da Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP).

Nota	Descrição – Equipamentos*	Quantidade**	Unidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Material	Quantidade (kg/ano)	Quantidade (kg/km)
#01	Caminhão basculante	15	unid.	2,30E+04	3,45E+05	6	aço	5,75E+04	3,26E+02
#02	Usina de asfalto a quente	5	unid.	4,90E+04	2,45E+05	7	aço	3,50E+04	1,99E+02
#03	Rolo compactador de pneus autopropelido	5	unid.	1,08E+04	5,40E+04	6	aço	9,00E+03	5,11E+01
#04	Caminhão tanque	5	unid.	2,30E+04	1,15E+05	7	aço	1,64E+04	9,32E+01
#05	Motoniveladora	5	unid.	1,30E+04	6,52E+04	7	aço	9,31E+03	5,28E+01
#06	Escavadeira hidráulica	5	unid.	2,40E+04	1,20E+05	5	aço	2,40E+04	1,36E+02
#07	Vibroacabadora de asfalto	5	unid.	1,35E+04	6,75E+04	7	aço	9,64E+03	5,47E+01
#08	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido	5	unid.	1,31E+04	6,53E+04	6	aço	1,09E+04	6,17E+01
#09	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido	5	unid.	1,08E+04	5,42E+04	6	aço	9,03E+03	5,13E+01
#10	Trator agrícola sobre pneus	5	unid.	5,78E+03	2,89E+04	6	aço	4,81E+03	2,73E+01
#11	Caminhão tanque distribuidor de asfalto	5	unid.	1,60E+04	8,00E+04	7	aço	1,14E+04	6,48E+01
#12	Carregadeira de pneus com capacidade	5	unid.	9,99E+03	5,00E+04	5	aço	9,99E+03	5,67E+01
#13	Caminhão silo	5	unid.	4,85E+04	2,43E+05	7	aço	3,46E+04	1,97E+02
Total (kg/aço)					1,53E+06			2,42E+05	1,37E+03

* Os tipos de equipamentos/veículos utilizados na construção das rodovias foram coletados no manual do DNIT.

** A quantidade de cada equipamento foi obtida em reunião participativa com engenheiros especialistas em rodovias que sugeriram a quantidade necessária por frente de trabalho (um canteiro de obras ou etapa de construção), em seguida, multiplicou a quantidade de equipamentos por frente de trabalho.

Exemplo, no caso da rota 1 são 5 frentes.

Tabela G3. Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP): equipamentos (h/a) e consumo de combustível.

Descrição (equipamentos)	Total/h/6a.	Total/h/1a.	l/h¹	l.diesel/6a²
Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 210 kW	136.801,35	22.800,23	37,8	5.171.091,11
Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	20.014,09	3.335,68	0	-
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	46.610,92	7.768,49	15,3	713.147,12
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	35.925,87	5.987,64	33,84	1.215.731,27
Motoniveladora - 93 kW	43.284,17	7.214,03	16,74	724.577,04
Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,5 m ³ - 110 kW	26.529,56	4.421,59	19,8	525.285,37
Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	19.621,65	3.270,28	14,76	289.615,58
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	33.978,08	5.663,01	14,76	501.516,43
Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 11 t - 97 kW	16.089,76	2.681,63	17,46	280.927,17
Trator agrícola - 77 kW	26.836,18	4.472,70	13,86	371.949,48
Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	14.512,70	2.418,78	24,48	355.270,80
Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m ³ - 106 kW	16.011,27	2.668,55	19,08	305.495,05
Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 188 kW	4.313,79	718,97	33,84	145.978,79
Total (l/diesel)				10.600.585,22

¹Consumo de combustível (litro de diesel/hora): dados do SICRO.²Consumo de combustível (litro de diesel) em 6 anos (tempo de construção da rota).

Tabela G4. Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP): mão de obra (h/a).

Descrição (mão de obra)	Total/h/6 a.	Total/h/1 a.
Servente	335.868,71	55.978,12
Operador de equipamento pesado	287.423,83	47.903,97
Motorista de caminhão	191.553,71	31.925,62

- A Tabela G5 mostra o inventário final para a **rota 2**, considerando toda a sua construção, os quantitativos por ano, e por unidade funcional.

As Tabelas G6, G7 e G8 servem como suporte para a elaboração do inventário da Tabela G5.

Tabela G5. Inventário da Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR).

Tabela G5: Inventário da Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR).				
Item	Unidade	Rota 2		
		Total da rota ¹	unidade/ ano ²	unidade/ ton.carne na China
Fase construção - sistema rodoviário				
Aço	kg	9,52E+06	6,42E+05	2,64E+00
Aço (pontes, viadutos e trevos)	kg	7,99E+06	4,00E+05	1,64E+00
Aço (equipamentos) ³	kg	1,53E+06	2,42E+05	9,95E-01
Concreto	m³	7,61E+04	3,81E+03	1,57E-02
Diesel	l	9,32E+06	4,66E+05	1,92E+00
Brita	ton	1,43E+06	7,15E+04	2,94E-01
Areia	ton	1,62E+05	8,10E+03	3,33E-02
Filler	ton	3,25E+04	1,63E+03	6,68E-03
Cimento	ton	8,99E+04	4,50E+03	1,85E-02
Cascalho	ton	1,23E+07	6,15E+05	2,53E+00
Água	ton	8,63E+05	4,32E+04	1,77E-01
CM-30	l	1,88E+07	9,40E+05	3,87E+00
Mão de obra	pessoas	1,05E+02	1,05E+02	4,32E-04

¹Quantidade total de equipamentos, materiais e mão de obra para a construção da ROTA 2.

² valores anuais: dados gerais da construção divididos pela vida útil da rodovia (apenas para materiais); o aço dos equipamentos foi calculado com base na vida útil dos veículos usados na construção da rodovia.

Vida útil considerada para a rodovia: 20 anos (informação coletada em reunião com engenheiros de rodovias).

³Aço dos equipamentos: ver Tabela G6.

Rota 2: 1096,44 km - 182,74 km/ano - 6 anos (tempo de construção).

Tabela G6. Inventário dos Equipamentos da Rota 2 (Campo Grande/M - Porto de Paranaguá/PR).

Item	Descrição – Equipamentos*	Quantidade **	Unidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Material	Quantidade (kg/ano)	Quantidade (kg/km)
#01	Caminhão basculante	15	unid.	2,30E+04	3,45E+05	6	aço	5,75E+04	3,15E+02
#02	Usina de asfalto a quente	5	unid.	4,90E+04	2,45E+05	7	aço	3,50E+04	1,92E+02
#03	Rolo compactador de pneus autopropelido	5	unid.	1,08E+04	5,40E+04	6	aço	9,00E+03	4,93E+01
#04	Caminhão tanque	5	unid.	2,30E+04	1,15E+05	7	aço	1,64E+04	8,99E+01
#05	Motoniveladora	5	unid.	1,30E+04	6,52E+04	7	aço	9,31E+03	5,09E+01
#06	Escavadeira hidráulica	5	unid.	2,40E+04	1,20E+05	5	aço	2,40E+04	1,31E+02
#07	Vibroacabadora de asfalto	5	unid.	1,35E+04	6,75E+04	7	aço	9,64E+03	5,28E+01
#08	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido	5	unid.	1,31E+04	6,53E+04	6	aço	1,09E+04	5,95E+01
#09	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido	5	unid.	1,08E+04	5,42E+04	6	aço	9,03E+03	4,94E+01
#10	Trator agrícola sobre pneus	5	unid.	5,78E+03	2,89E+04	6	aço	4,81E+03	2,63E+01
#11	Caminhão tanque distribuidor de asfalto	5	unid.	1,60E+04	8,00E+04	7	aço	1,14E+04	6,25E+01
#12	Carregadeira de pneus com capacidade	5	unid.	9,99E+03	5,00E+04	5	aço	9,99E+03	5,47E+01
#13	Caminhão silo	5	unid.	4,85E+04	2,43E+05	7	aço	3,46E+04	1,90E+02
Total (kg/aço)					1,53E+06			2,42E+05	1,32E+03

* Os tipos de equipamentos/veículos utilizados na construção das rodovias foram coletados no manual do DNIT.

** A quantidade de cada equipamento foi obtida em reunião participativa com engenheiros especialistas em rodovias que sugeriram a quantidade necessária por frente de trabalho (um canteiro de obras ou etapa de construção), em seguida, multiplicou a quantidade de equipamentos por frente de trabalho. Exemplo, no caso da rota 1 são 5 frentes.

Tabela G7. Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR): equipamentos (h/a) e consumo de combustível.

Descrição	Total/h/6a.	Total/h/1a.	l/h¹	l.diesel/6a²
Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 210 kW	120.251,47	20.041,91	37,80	4.545.505,65
Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	17.592,83	2.932,14	-	-
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	40.972,05	6.828,68	15,30	626.872,39
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	31.579,65	5.263,27	33,84	1.068.655,22
Motoniveladora - 93 kW	38.047,76	6.341,29	16,74	636.919,50
Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,5 m ³ - 110 kW	23.320,08	3.886,68	19,80	461.737,68
Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	17.247,88	2.874,65	14,76	254.578,65
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	29.867,50	4.977,92	14,76	440.844,26
Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 11 t - 97 kW	14.143,26	2.357,21	17,46	246.941,32
Trator agrícola - 77 kW	23.589,61	3.931,60	13,86	326.951,97
Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 136 kW	12.756,99	2.126,16	24,48	312.291,04
Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m ³ - 106 kW	14.074,27	2.345,71	19,08	268.537,04
Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 188 kW	3.791,92	631,99	33,84	128.318,67
Total (l/diesel)			9.318.153,40	

¹Consumo de combustível (litro/hora): dados do SICRO.²Consumo de combustível (litro) em 6 anos.

Tabela G8. Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR): mão de obra (h/a).

Descrição (mão de obra)	Total/h/6 a.	Total/h/1 a.
Servente	295.236,17	49.206,03
Operador de equipamento pesado	252.652,02	42.108,67
Motorista de caminhão	168.380,03	28.063,34

- A Tabela G9 mostra o inventário final para a **rota 3**, considerando toda a sua construção, os quantitativos por ano, e por unidade funcional.
- As Tabelas G10, G11 e G12 servem como suporte para a elaboração do inventário da Tabela G9.

Tabela G9. Inventário da Rota 3 (Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile).

Item	Unidade	Rota 3		
		Total da rota ¹	unidade/ ano ²	unidade/ ton.carne na China
Fase construção - sistema rodoviário				
Aço	kg	1,70E+07	1,25E+06	1,94E+01
Aço (pontes, viadutos e trevos)	kg	1,33E+07	6,65E+05	1,04E+01
Aço (equipamentos) ³	kg	3,68E+06	5,80E+05	9,03E+00
Concreto	m³	1,27E+05	6,35E+03	9,88E-02
Diesel	l	1,55E+07	7,75E+05	1,21E+01
Brita	ton	2,57E+06	1,29E+05	2,00E+00
Areia	ton	2,92E+05	1,46E+04	2,27E-01
Filler	ton	5,86E+04	2,93E+03	4,56E-02
Cimento	ton	1,62E+05	8,10E+03	1,26E-01
Cascalho	ton	1,27E+07	6,35E+05	9,88E+00
Água	ton	8,86E+05	4,43E+04	6,90E-01
CM-30	l	3,40E+07	1,70E+06	2,65E+01
Mão de obra	pessoas	2,81E+02	2,81E+02	4,37E-03

¹Quantidade total de equipamentos, materiais e mão de obra para a construção da ROTA 3.

² valores anuais: dados gerais da construção divididos pela vida útil da rodovia (apenas para materiais); o aço dos equipamentos foi calculado com base na vida útil dos veículos usados na construção da rodovia.

Vida útil considerada para a rodovia: 20 anos (informação coletada em reunião com engenheiros de rodovias).

³Aço dos equipamentos: ver Tabela G10.

Rota 3: 2465,04 km - 176,074 km/ano - 14 anos (tempo de construção).

Tabela G10. Inventário dos Equipamentos da Rota 3 (Campo Grande/M - Porto de Iquique/Chile).

Nota	Descrição*	Quantidade**	Unidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Mate-rial	Quantidade (kg/ano)	Quantidade (kg/km)
	Equipamentos								
#01	Caminhão basculante	36	unid.	2,30E+04	8,28E+05	6	aço	1,38E+05	7,84E+02
#02	Usina de asfalto a quente	12	unid.	4,90E+04	5,88E+05	7	aço	8,40E+04	4,77E+02
#03	Rolo compactador de pneus autopropelido	12	unid.	1,08E+04	1,30E+05	6	aço	2,16E+04	1,23E+02
#04	Caminhão tanque	12	unid.	2,30E+04	2,76E+05	7	aço	3,94E+04	2,24E+02
#05	Motoniveladora	12	unid.	1,30E+04	1,56E+05	7	aço	2,23E+04	1,27E+02
#06	Escavadeira hidráulica	12	unid.	2,40E+04	2,88E+05	5	aço	5,76E+04	3,27E+02
#07	Vibroacabadora de asfalto	12	unid.	1,35E+04	1,62E+05	7	aço	2,31E+04	1,31E+02
#08	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido	12	unid.	1,31E+04	1,57E+05	6	aço	2,61E+04	1,48E+02
#09	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido	12	unid.	1,08E+04	1,30E+05	6	aço	2,17E+04	1,23E+02
#10	Trator agrícola sobre pneus	12	unid.	5,78E+03	6,93E+04	6	aço	1,16E+04	6,56E+01
#11	Caminhão tanque distribuidor de asfalto	12	unid.	1,60E+04	1,92E+05	7	aço	2,74E+04	1,56E+02
#12	Carregadeira de pneus com capacidade	12	unid.	9,99E+03	1,20E+05	5	aço	2,40E+04	1,36E+02
#13	Caminhão silo	12	unid.	4,85E+04	5,82E+05	7	aço	8,31E+04	4,72E+02
Total (kg/aço)					3,68E+06			5,80E+05	3,29E+03

* Os tipos de equipamentos/veículos utilizados na construção das rodovias foram coletados no manual do DNIT.

** A quantidade de cada equipamento foi obtida em reunião participativa com engenheiros especialistas em rodovias que sugeriram a quantidade necessária por frente de trabalho (um canteiro de obras ou etapa de construção), em seguida, multiplicou a quantidade de equipamentos por frente de trabalho.

Exemplo, no caso da rota 1 são 5 frentes.

Tabela G11. Rota 3 (Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile): equipamentos (h/a) e consumo de combustível.

Descrição	Total/h/14a.	Total/h/1a.	l/h¹	l.diesel/14a.²
Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kw	199.591,87	33.265,31	37,8	7.544.572,62
Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	29.200,35	4.866,72		-
Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	68.004,90	11.334,15	15,3	1.040.475,04
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kw	52.415,49	8.735,92	33,84	1.773.740,29
Motoniveladora - 93 kw	63.151,18	10.525,20	16,74	1.057.150,73
Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kw	38.706,38	6.451,06	19,8	766.386,32
Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kw	28.627,80	4.771,30	14,76	422.546,37
Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kw	49.573,69	8.262,28	14,76	731.707,69
Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kw	23.474,79	3.912,46	17,46	409.869,80
Trator agrícola sobre pneus - 77 kw	39.153,73	6.525,62	13,86	542.670,72
Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kw/136 kw	21.173,89	3.528,98	24,48	518.336,72
Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kw	23.360,28	3.893,38	19,08	445.714,13
Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	6.293,78	1.048,96	33,84	212.981,68
Total (diesel)				15.466.152,11

¹Consumo de combustível (litro/hora): dados do SICRO.²Consumo de combustível (litro) em 14 anos.

Tabela G12. Rota 3 (Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile): mão de obra (h/a).

Descrição (mão de obra)	Total/h/14a.	Total/h/1a.
Servente	490.029,26	35.002,09
Operador de equipamento pesado	419.348,58	29.953,47
Motorista de caminhão	279.475,03	19.962,50

Apêndice H. Inventário de dados da etapa de operação das rotas rodoviárias estudadas.

Neste apêndice são apresentados os equipamentos, custos, transporte de carga e tempo de viagem da etapa de operação.

A Tabela H1 mostra a descrição e tipo de veículo, e tipo de combustível usado para o transporte de carne bovina.

Tabela H1. Inventário de dados da etapa de operação rodoviária das três rotas logísticas de exportação avaliadas.

Item	Descrição	Peso (kg)	Vida útil (ano)	Combustível	Referência
1	Caminhão trator	26.100,00	8	Diesel	Modelo R-450 A 6x2, Motor DC13 164 / 450 cv / Torque = 2350Nm - Scania
2	Semirreboque	8.000,00	5	-	Porta contêiner, estrutura de sustentação e fixação do contêiner. Travas de contêiner: Twist locks, dispositivos de travas de contêiner em aço fundido - Facchini.
3	Contêiner (<i>reefer</i>) 40' Pés	4.720,00	10	Elétrico	Contêiner refrigerado - Celtas Container.

As Tabelas H2, H3 e H4 mostram a quantidade de veículos que operam anualmente no transporte de carne bovina entre as rodovias, assim como a quantidade de aço desses equipamentos para uso no cálculo da emergência.

Tabela H2. Inventário de dados da etapa de operação da Rota 1 (Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP).

Nota	Descrição Equipamentos	Quantidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Material	Quantidade (kg/ano)
#01	Caminhão	3,92E+04	2,61E+04	1,02E+09	8	aço	1,28E+08
#02	Semirreboque	3,92E+04	8,00E+03	3,14E+08	5	aço	6,27E+07
#03	Contêiner	3,92E+04	4,72E+03	1,85E+08	10	aço	1,85E+07
Total				1,52E+09			2,09E+08

Tabela H3. Inventário de dados da etapa de operação da Rota 2 (Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR).

Nota	Descrição Equipamentos	Quantidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Material	Quantidade (kg/ano)
#01	Caminhão	1,11E+04	2,61E+04	2,88E+08	8	aço	3,61E+07
#02	Semirreboque	1,11E+04	8,00E+03	8,84E+07	5	aço	1,77E+07
#03	Contêiner	1,11E+04	4,72E+03	5,22E+07	10	aço	5,22E+06
Total				4,29E+08			5,90E+07

Tabela H4. Inventário de dados da etapa de operação da Rota 3 (Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile).

Nota	Descrição Equipamentos	Quantidade	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)	Vida útil (anos)	Material	Quantidade (kg/ano)
#01	Caminhão	2,92E+03	2,61E+04	7,62E+07	8	aço	9,53E+06
#02	Semirreboque	2,92E+03	8,00E+03	2,34E+07	5	aço	4,67E+06
#03	Contêiner	2,92E+03	4,72E+03	1,38E+07	10	aço	1,38E+06
Total				1,13E+08			1,56E+07

As Tabelas H5 e H6 mostram os custos de implementação e operação das rodovias.

Tabela H5. Custo médio gerencial - custo de implementação das rodovias.

Rotas	km	Custos Médios (R\$/rota)¹	Preços Médios (R\$/rota)²	Preços Médios (R\$/ano)³
Rota 1 - Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP	1057,52	3,22E+09	3,95E+09	1,98E+08
Rota 2 - Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR	1096,44	3,70E+09	4,52E+09	2,26E+08
Rota 3 - Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile	2465,04	5,39E+09	6,62E+09	3,31E+08

¹ Custos Médios: todos os custos envolvidos na produção (direto, indireto, financeiro).

² Preço Médio: refere-se ao valor de mercado de um bem ou serviço; pode ser entendido como o valor pago por um determinado trecho de rodovia.

³ Para se obter o custo anual, divide-se o custo de implementação (2) por 20 anos (vida útil considerada para as rodovias)

Simulador de Custos Médios Gerenciais, FGV/IBRE/DNIT (<https://simuladorcmg-ibre.fgv.br/>).

Valores (em reais): mês base - out/2023.

Tabela H6. Custo de operação para o transporte de carne bovina das rodovias para o ano de 2023.

Rotas	Ano	Quantidade de carne transportada (toneladas)	Quantidade de caminhões (unid./ano)	Litros de combustível (l/diesel)	Custo com combustível (R\$/ano)	Pedágio (R\$/ano)
Rota 1 - Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP	2023	8.62E+05	3.92E+04	1.48E+07	8.87E+07	5.26E+07
Rota 2 - Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR	2023	2.43E+05	1.11E+04	4.32E+06	2.59E+07	2.70E+06
Rota 3 - Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile	2023*	6.42E+04	2.92E+03	2.57E+06	1.54E+07	9.13E+06

*simulação (detalhes na Tabela H7).

A Tabela H7 mostra em detalhes o processo para estimar a quantidade de veículos para a rota de exportação 3.

Tabela H7. Estimativa de veículos que passarão pela rota de exportação 3 com base no ano de 2023.

2023						
Rotas	Cenário	Nº caminhões (carne)		VDMa ¹	Percentual (%) ⁴	Referência
		ano	dia	veículos comerciais (cargas)		
1 - Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP	atual	39.201	108	6.394	1,69%	SP-021 (km 75)
2 - Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR	atual	11.051	31	3.478	0,89%	BR-277 (km 12)
3 - Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile ²	atual	0	0	81	0	Dique Porto Murtinho
3 - Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile ³	simulação	1825-3650	5-10	606	0,89% - 1,69%	BR-060 c/ MS-162

¹Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo/Departamento de Estradas de Rodagem (<https://www.der.sp.gov.br/WebSite/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>); DNIT, PNCT, Estimativa do Volume Médio Diário Anual-VMDa, Dados estimativa VMDa, versão 2022 (Excel) (<https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pncv-2023-2>).

²Rota 3 (cenário atual): apenas os valores de VDMa; valores de referência: BR-267, próximo à entrada de Porto Murtinho (dique); fonte idem Rotas 1 e 2.

³Rota 3 (cenário simulado): foram considerados os dados de VMDa (apenas dos veículos comerciais de cargas: 606) da BR-060 (c/ MS-162), sentido crescente, em direção à BR-267. Esse trecho é de pista simples, com o maior número VDMa numa pista simples, à excessão das BR-267 e BR-262, que dão acesso ao estado de São Paulo, e a BR-163 (longitudinal), apresentando diversos trechos duplicados, ligando o MS aos estados do Mato Grosso e Paraná.

Percentual: foram considerados os percentuais das Rotas 1 e 2, para simulação - Paranaguá (0,89%); Santos (1,69%).

Veículos comerciais/dia: 606 (Rota 3, VDMa) x 1,69% (Rota 1) = 10 (caminhões/dia); 606 (Rota 2, VDMa) x 0,89% (Rota 2) = 5 (caminhões/dia)

⁴Percentual de caminhões (carga: carne bovina) em relação ao total de veículos comerciais que trafegam por dia. Equação: número de caminhões-dia/VDMa = % (percentual de veículos).

A Tabela H8 mostra o tempo de viagem para as rotas logísticas de exportação 1, 2 e 3, trecho rodoviário.

Tabela H8. Tempo de viagem por rota rodoviária.

Rotas	km	Tempo de viagem	Quantidade de diesel (l)	Consumo de diesel (km/l)	Custo por litro de diesel (R\$)	Custo total com diesel (R\$)	Custo com pedágio (R\$)	Custo total da viagem (R\$)
Rota 1: Campo Grande/MS - Porto de Santos/SP	1057,52	11h03min	377,69	2,8	5,99	2.262,34	1.341,60	3.603,94
Rota 2: Campo Grande/MS - Porto de Paranaguá/PR	1096,44	12h15min	391,3	2,8	5,99	2.343,87	244,20	2.588,07
Rota 3: Campo Grande/MS - Porto de Iquique/Chile	2465,04	30h49min	880,37	2,8	5,99	5.273,42	3.127,22	8.400,64

O consumo de combustível (2,8 l/km) e o valor do diesel (R\$5,99/litro) foram as médias sugeridas por motoristas que fazem a rota Brasil-Chile, com carga de carne bovina.

Nas Rotas 1 e 2 foi utilizada a ferramenta para cálculo de viagens rodoviárias 'QualP' (<https://qualp.com.br>).

Os cálculos da Rota 3 foram estimados com base na extensão do percurso, na média do consumo (l/km) e valor do combustível (R\$5,99), e tendo como referência o valor do pedágio da Rota 1.

A Tabela H9 mostra a quantidade de carne bovina brasileira transportada em cada uma das rotas estudadas até a China.

Tabela H9. Quantidade de carne bovina brasileira transportada por rota rodoviária para o ano de 2023.

Rotas	Quantidade de carne (toneladas)
Porto de Santos	862.411
Porto de Paranaguá	243.128
Porto de Iquique	64.240

Cada caminhão transporte em média 22 toneladas de carne bovina (por contêiner).
ComexStat, 2024 (<https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>).

Apêndice I. Detalhes de cálculo das emissões de CO₂-eq./ton.carne na China.

As Tabelas I1 e I2 mostram os fatores de caracterização coletados na base de dados do *ecoinvent* e literatura.

Tabela I1. Fatores de caracterização para cálculo das emissões indiretas.

Item	Unidade	Categoria de impacto	Process Name	Product
		Potencial de aquecimento global		
		GWP 100 (kgCO ₂ eq./unid.)		
Aço	1 kg	4,55E+00	Steel production and working, total process (Production + metal working)	Steel [kg]
Primary Steel Production	1 kg	2,42E+00	Steel production, converter, low-alloyed, RoW (320)	Steel, low-alloyed [kg]
Steel Metal Working	1 kg	2,13E+00	Metal working, average for steel product manufacturing, RoW (271)	Metal working, average for steel product manufacturing [kg]
Concreto	1 m3	2,61E+02	market for concrete, 40MPa, BR	Concrete, 40MPa [m ³]
Diesel	1 kg	3,97E-01	Market for diesel, BR	Diesel [kg]
Brita	1 kg	7,65E-03	Market for gravel, crushed, BR	Gravel, crushed [kg]
Areia	1 kg	7,65E-03	Market for gravel, crushed, BR	Gravel, crushed [kg]
Filler	1 kg	3,73E-02	Market for inert filler, GLO	Inert filler [kg]
Cimento	1 kg	8,59E-01	Market for cement, Portland, BR	Cement, Portland [kg]
Cascalho	1 kg	7,65E-03	Market for gravel, crushed, BR	Gravel, crushed [kg]
CM-30	1 kg	2,25E-01	Market for petroleum, GLO	Petroleum, kg

Fonte: Ecoinvent Database (<https://www.ecoinvent.org/login-databases.html>), Version 3.8 (2021), Allocation, cut-off by classification; ReCiPe Midpoint (H) V1.13.

Tabela I2. Fatores de caracterização para cálculo das emissões diretas.

Fatores de caracterização - emissões diretas	
Emissões	Potencial de aquecimento global
	(kgCO _{2eq} /kg)
CH ₄	22,25
CO ₂	1
NO _x	-
N ₂ O	298
NM VOC	-
PM10	-

Characterization Factors from ReCiPe 2008 Midpoint (H) method V 1.11

Fonte: RIVM. Life Cycle Assessment (LCA). ReCiPe. Characterisation and normalisation factors (updated December 2014). Available in: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Accessed 23 nov. 2024.

As Tabelas I3 e I4 referem-se ao cálculo das emissões de CO_{2eq}, e o valor total emitido em cada rota é indicado em seguida.

Tabela I3. Cálculo das emissões diretas para as rotas de exportação (sistemas rodoviário e marítimo).

Inventário de emissões diretas - queima do diesel nos motores					Emissões diretas por ano			Emissões diretas por km-ano			Em. diretas por ton. carne China		
Rotas					GWP (kgCO _{2eq} /ano)			GWP (kgCO _{2eq} /km-ano)			GWP (kgCO _{2eq} /km-ton. carne na China)		
Emissions	Unidade /ano	Rota 1 Quant.	Rota 2 Quant.	Rota 3 Quant.	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3
CH ₄	kg	1.77E+04	5.23E+03	1.60E+03	3.94E+05	1.16E+05	3.55E+04	1.83E+01	5.37E+00	1.70E+00	2.12E-05	2.21E-05	2.65E-05
CO ₂	kg	2.75E+08	8.11E+07	2.47E+07	2.75E+08	8.11E+07	2.47E+07	1.28E+04	3.74E+03	1.18E+03	1.48E-02	1.54E-02	1.84E-02
NO _x	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	kg	8.86E+03	2.62E+03	7.98E+02	2.64E+06	7.80E+05	2.38E+05	1.23E+02	3.60E+01	1.14E+01	1.42E-04	1.48E-04	1.77E-04
NM VOC	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PM10	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissões diretas totais					2.78E+08	8.20E+07	2.50E+07	1.29E+04	3.78E+03	1.20E+03	1.49E-02	1.56E-02	1.86E-02

Procedimento de cálculo: a quantidade emitida correspondente a cada gás de efeito estufa (em kg/ano) de cada rota (rodovia e mar) é multiplicado pelo fator de caracterização da Tabela I2, resultando nos valores das emissões diretas em kgCO_{2eq}/ano.

Tabela I4. Cálculo das emissões indiretas para as rotas de exportação (sistemas rodoviários e marítimos).

Inventário de emissões indiretas				Emissões indiretas por rota			Emissões indiretas por rota			Emissões indiretas por rota			
Item	Unidade	Quantidade de materiais e equipamentos (unidade) ^a			Potencial de aquecimento global GWP 100 (kgCO2eq./unid.) ^b			Potencial de aquecimento global GWP 100 (kgCO2eq./unid.) ^c			Potencial de aquecimento global GWP 100 (kgCO2eq./km-ton. carne na China) ^d		
		Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3
		unid./ano	unid./ano	unid./ano	unid./ano	unid./ano	unid./ano	/km-ano	/km-ano	/km-ano	/km-ton. carne	/km-ton. carne	/km-ton. carne
Fase construção - sistema rodoviário													
Aço	kg	2.74E+06	6.42E+05	1.25E+06	1.25E+07	2.92E+06	5.66E+06	1.18E+04	2.66E+03	2.30E+03	1.37E-02	1.09E-02	3.58E-02
Concreto	m³	2.37E+04	3.81E+03	6.35E+03	6.18E+06	9.92E+05	1.65E+06	5.84E+03	9.04E+02	6.71E+02	6.77E-03	3.72E-03	1.05E-02
Diesel	l	5.30E+05	4.66E+05	7.75E+05	2.46E+05	2.17E+05	3.60E+05	2.33E+02	1.98E+02	1.46E+02	2.70E-04	8.13E-04	2.27E-03
Brita	ton	8.15E+04	7.15E+04	1.29E+05	6.23E-01	5.47E-01	9.83E-01	5.89E-04	4.99E-04	3.99E-04	6.83E-10	2.05E-09	6.21E-09
Areia	ton	9.25E+03	8.10E+03	1.46E+04	7.07E-02	6.19E-02	1.12E-01	6.69E-05	5.65E-05	4.53E-05	7.76E-11	2.32E-10	7.05E-10
Filler	ton	1.86E+03	1.63E+03	2.93E+03	6.92E-02	6.06E-02	1.09E-01	6.55E-05	5.53E-05	4.44E-05	7.59E-11	2.28E-10	6.91E-10
Cimento	ton	5.15E+03	4.50E+03	8.10E+03	4.43E+00	3.86E+00	6.96E+00	4.19E-03	3.52E-03	2.82E-03	4.85E-09	1.45E-08	4.40E-08
Cascalho	ton	4.70E+05	6.15E+05	6.35E+05	3.59E+00	4.70E+00	4.86E+00	3.40E-03	4.29E-03	1.97E-03	3.94E-09	1.76E-08	3.07E-08
CM-30	l	1.10E+06	9.40E+05	1.70E+06	2.46E+05	2.11E+05	3.82E+05	2.33E+02	1.93E+02	1.55E+02	2.70E-04	7.92E-04	2.41E-03
Fase de operação - sistema rodoviário													
Aço dos veículos	kg	2.09E+08	5.90E+07	1.56E+07	9.51E+08	2.68E+08	7.09E+07	9.00E+05	2.45E+05	2.88E+04	1.04E+00	1.01E+00	4.48E-01
Diesel	l	1.48E+07	4.32E+06	2.57E+06	6.88E+06	2.01E+06	1.19E+06	6.51E+03	1.83E+03	4.85E+02	7.55E-03	7.54E-03	7.55E-03
Fase de operação - sistema marítimo ^b													
Aço dos navios	kg	3.66E+07	1.06E+07	2.78E+06	1.66E+08	4.85E+07	1.26E+07	8.13E+03	2.35E+03	6.87E+02	9.42E-03	9.68E-03	1.07E-02
Diesel	l	9.01E+07	2.64E+07	6.15E+06	4.19E+07	1.23E+07	2.86E+06	2.05E+03	5.96E+02	1.55E+02	2.37E-03	2.45E-03	2.42E-03
Emissões indiretas totais					1.19E+09	3.35E+08	9.56E+07	9.34E+05	2.53E+05	3.33E+04	1.08E+00	1.04E+00	5.19E-01

Procedimento de cálculo: a quantidade emitida correspondente a cada gás de efeito estufa (em kg/ano) de cada rota é multiplicado pelo fator de caracterização da Tabela I1, resultando nos valores das emissões diretas em kgCO₂eq/ano.

Obs.: A densidade do diesel é de cerca de 0,853 kg/L (conversão necessária pois os fatores de conversão estão em kg e o inventário em litros); A densidade do CM30 está entre 1,0 a 1,1 kg/L, neste estudo foi considerado como 1,0 kg/l.

^a Valor total de materiais, equipamentos, etc, utilizado para as fases de construção e operação das rotas rodoviárias, e operação do trecho marítimo em unidades/ano.

^b Valor das fases de construção e operação das rotas rodoviárias, e operação do trecho marítimo; multiplicado pelos fatores de caracterização (ecoinvent) resultando em kgCO₂/ano

^c Valor das fases de construção e operação das rotas rodoviárias, e operação do trecho marítimo; dividido pela kilometragem de cada trecho resultando em kgCO₂/km-ano


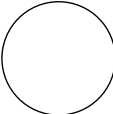
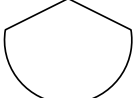

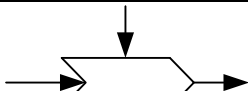

^d Valores de kgCO₂/km-ano dividido pela quantidade de carne (em ton.) transportada anualmente em cada rota (unidade funcional) resultando em kgCO₂/km-ton. carne na China.

As emissões totais de CO_{2eq}. emitidos por unidade para as rotas de exportação (rodovia e mar) são apresentados a seguir. As emissões totais resultam da soma das emissões diretas e indiretas das Tabelas I3 e I4.

Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3
em kgCO _{2eq} /ano			em kgCO _{2eq} /km-ano			em kgCO _{2eq} /km-ton. carne na China		
1.47E+09	4.17E+08	1.21E+08	9.47E+05	2.57E+05	3.45E+04	1.10E+00	1.06E+00	5.38E-01

Apêndice J. Símbolos utilizados na elaboração do diagrama de energia.

Tabela J1. Símbolos utilizados na elaboração do diagrama de energia.

Símbolo	Descrição
	Fluxo de energia: um fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à qualidade da fonte que o produz.
	Fonte: fonte de energia externa.
	Estoque: uma reserva energética dentro do sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e saída.
	Sumidouro de energia: dispersão de energia potencial empregada no sistema. A energia potencial é utilizada para produzir trabalho e o custo dessa transformação é a degradação da energia, a qual deixa o sistema como energia de baixa intensidade (2ª Lei da Termodinâmica).
	Interação: intersecção de dois ou mais fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre outro.
	Caixa: símbolo para definir os limites de um sistema e subsistemas ou um processo.

Apêndice K. Memorial de cálculo da etapa de operação pelo sistema marítimo.

Abaixo são apresentados os memoriais de cálculo da operação pelo sistema marítimo utilizado no inventário da Tabela 2.

Os dados para a operação marítima são baseados em um navio porta contêiner, cujo peso é de 170.974.000,00 kg, com vida útil de 25 anos, movido a diesel e referência Emma Maersk (2006) - porta contêiner.

Rota de exportação 1 (porto de Santos)

Cálculo do aço

Dados:

- Peso de um navio: 170.974 toneladas (considerado totalmente em aço)
- Capacidade de carga: 14.770 contêineres de 20 pés ou 7.385 de 40 pés; porém, somente 1.000 contêineres são refrigerados (20 pés), ou 500 contêineres de 40 pés. Logo, a quantidade de contêineres usados para o transporte de carne bovina representa 6,77% da carga total (e que será usado como referência para o cálculo do aço e diesel do navio).
- Vida útil do navio: 25 anos
- Quantidade de carne exportada pelo porto de Santos (Tabela H9, Apêndice H): 862.411 ton./ano; base 2023
- Quantidade de carne/contêiner 40 pés: 22 ton. carne/contêiner

Memorial:

- Quantidade de navios para transportar a carne pelo porto de Santos
 - a) $862.411 \text{ ton.carne/ano} / 22 \text{ ton.carne/contêiner} = 39.201 \text{ contêineres/ano}$
 - b) 1 navio - 500 contêineres refrigerados de 40 pés

? navios - 39.201 contêineres 40 pés/ano

Logo (a partir da regra de três simples), 78,4 navios (ou seja, 79 navios).

- Quantidade de aço: 79 navios vezes 170.974 ton.aço/navio vezes 6,77% (porcentagem de carga refrigerada em relação a capacidade do navio) = 914.420,24 ton.aço dividido por 25 anos (vida útil) = 36.576,81 ton. de aço/ano para transportar a carne bovina do MS pelo porto de Santos.
- *Considerando a unidade funcional (1 tonelada de carne na China): 0,042 ton.aço/ton.carne na China*

Cálculo do diesel

Dados:

- Consumo de 13 ton/h, ou 312 ton/dia
- Tipo de combustível: variantes de óleo combustível pesado, combustível de petróleo menos refinado. Considerou-se a densidade do diesel de petróleo que é ~0,853 kg/L.
- Tempo de viagem até o porto de Xangai: 46d02h/viagem
- Quantidade de viagens: 78,4 viagens/ano (portanto, 79 viagens)

Memorial:

- Tempo de viagem por ano (dias/ano) = 79 viagens/ano x 46d02h (46,08d)/viagem = 3.640 dias e 13 horas ou 3.640,56 dias/ano

Logo, 3.640,56 dias/ano x 312 ton/dia x 6,77% = 76.897,36 ton.combustível/ano

- Consumo em litros: 76.897,36 ton.combustível/ano x 1.000 (ton para kg) dividido por 0,853 kg/L = 90.149.308,32 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

Cálculo da mão de obra

- Tripulação (mão de obra): 13 pessoas/viagem

- Quantidade de viagens: 79 viagens

Logo, $13 \times 79 = 1.027$ pessoas/ano

Rota de exportação 2 (Porto de Paranaguá)

Cálculo do aço

- Peso de um navio: 170.974 toneladas (considerado totalmente em aço)

- Capacidade de carga: 14.770 contêineres de 20 pés ou 7.385 de 40 pés; porém, somente 1.000 contêineres são refrigerados (20 pés), ou 500 contêineres de 40 pés. Logo, a quantidade de contêineres usados para o transporte de carne bovina representa 6,77% da carga total (e que será usado como referência para o cálculo do aço e diesel do navio).

- Vida útil do navio: 25 anos

- Quantidade de carne exportada pelo porto de Paranaguá (Tabela H9, Apêndice H): 243.128 ton./ano; base 2023

- Quantidade de carne/contêiner de 40 pés: 22 ton. carne/contêiner

Memorial:

- Quantidade de navios para transportar a carne pelo porto de Santos

a) $243.128 \text{ ton.carne/ano} / 22 \text{ ton.carne/contêiner} = 11.051 \text{ contêineres/ano}$

b) 1 navio - 500 contêineres de 40 pés

? navios - 11.051 contêineres 40 pés/ano

Logo (a partir da regra de três simples), 22,1 navios (ou seja, 23 viagens).

- Quantidade de aço: 23 navios (viagens) vezes 170.974 ton.aço/navio vezes 6,77% (porcentagem de carga refrigerada em relação a capacidade do navio) = 266.223,62 ton.aço dividido por 25 anos (vida útil) = 10.648,94 ton. de aço/ano para transportar a carne bovina do MS pelo porto de Paranaguá.
- *Considerando a unidade funcional (1 tonelada de carne na China): 0,044 ton.aço/ton.carne na China*

Cálculo do diesel

Dados:

- Consumo de 13 ton/h, ou 312 ton/dia
- Tipo de combustível: variantes de óleo combustível pesado, combustível de petróleo menos refinado. Considerou-se a densidade do diesel de petróleo que é ~0,853 kg/L.
- Tempo de viagem até o porto de Xangai: 46d07h/viagem
- Quantidade de viagens: 22,1 navios (portanto, 23 viagens).

Memorial:

- Tempo de viagem por ano (dias/ano) = 23 viagens/ano x 46d07h(46,29d)/viagem = 1.064 dias e 16 horas ou 1.064,67 dias/ano
- Logo, 1.064,67 dias/ano x 312 ton/dia x 6,77% = 22.488,39 ton.combustível/ano
- Consumo em litros: 22.488,39 ton.combustível/ano x 1.000 (ton para kg) dividido por 0,853 kg/L = 26.363.880,42 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

Cálculo da mão de obra

- Tripulação (mão de obra): 13 pessoas/viagem
- Quantidade de viagens: 23 viagens

Logo, $13 \times 23 = 299$ pessoas/ano

Rota de exportação 3 (Porto de Iquique, Chile)

Cálculo do aço

- Peso de um navio: 170.974 toneladas (considerado totalmente em aço)
- Capacidade de carga: 14.770 contêineres de 20 pés ou 7.385 de 40 pés; porém, somente 1.000 contêineres são refrigerados (20 pés), ou 500 contêineres de 40 pés. Logo, a quantidade de contêineres usados para o transporte de carne bovina representa 6,77% da carga total (e que será usado como referência para o cálculo do aço e diesel do navio).
- Vida útil do navio: 25 anos
- Quantidade de carne exportada pelo porto de Iquique (Tabela H9, Apêndice H): 64.240 ton./ano; base 2023
- Quantidade de carne/contêiner de 40 pés: 22 ton. carne/contêiner

Memorial:

- Quantidade de navios para transportar a carne pelo porto de Santos
- a) $64.240 \text{ ton.carne/ano} / 22 \text{ ton.carne/contêiner} = 2.920 \text{ contêineres/ano}$
- b)

1 navio	-	500 contêineres de 40 pés
? navios	-	2.920 contêineres 40 pés/ano

Logo (a partir da regra de três simples), 5,84 navios (ou seja, 6 viagens).

- Quantidade de aço: 6 navios (viagens) vezes 170.974 ton.aço/navio vezes 6,77% (porcentagem de carga refrigerada em relação a capacidade do navio) = 69.449,64

ton.aço dividido por 25 anos (vida útil) = 2.777,99 ton. de aço/ano para transportar a carne bovina do MS pelo porto de Iquique.

- *Considerando a unidade funcional (1 tonelada de carne na China): 0,043 ton.aço/ton.carne na China*

Cálculo do diesel

Dados:

- Consumo de 13 ton/h, ou 312 ton/dia
- Tipo de combustível: variantes de óleo combustível pesado, combustível de petróleo menos refinado. Considerou-se a densidade do diesel de petróleo que é ~0,853 kg/L.
- Tempo de viagem até o porto de Xangai: 41d10h/viagem
- Quantidade de viagens: 5,84 navios (portanto, 6 viagens)

Memorial:

- Tempo de viagem por ano (dias/ano) = 6 viagens/ano x 41d10h(41,42)/viagem = 248 dias e 12 horas ou 248,52 dias/ano

Logo, 248,52 dias/ano x 312 ton/dia x 6,77% = 5.249,34 ton.combustível/ano

- Consumo em litros: 5.249,34 ton.combustível/ano x 1.000 (ton para kg) dividido por 0,853 kg/L = 6.153.974,21 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

Cálculo da mão de obra

- Tripulação (mão de obra): 13 pessoas/viagem
- Quantidade de viagens: 6 viagens

Logo, 13 x 6 = 78 pessoas/ano

Apêndice L. Custos e tempo de viagem da etapa de operação pelo sistema marítimo.

Abaixo são apresentados os custos de operação marítimo (Tabela L1) e o tempo de viagem (Tabela L2) para o transporte de carne para cada rota logística de exportação.

Tabela L1. Custo de operação marítimo para o transporte de carne bovina para o ano de 2023.

Rotas	km	Tempo de viagem	Qtd. de combustível (litros/ano)	Consumo diário (ton./dia)	Custo do combustível (R\$/l)	Consumo de combustível total (R\$/ano)
Rota 1 - Porto de Santos/SP - Porto de Xangai/China ¹	20,476	46d02h	90,149,308.32	312	5.99	539,994,356.84
Rota 2 - Porto de Paranaguá/PR - Porto de Xangai/China ²	20,578	46d07h	26,363,880.42	312	5.99	157,919,643.72
Rota 3 - Porto de Iquique/Chile - Porto de Xangai/China ³	18,409	41d10h	6,153,974.21	312	5.99	36,862,305.52

¹ Rota 1: 79 navios x 46,08d = 3640,56 d/a; Logo, 3.640,56 d/a x 312 ton/dia x 6,77% (n. contêiners reefers) = 76.897,36 ton. combustível/ano; Consumo em litros: 76.897,36 ton.comb./ano x 1000 (ton. para kg) dividido por 0,853 kg/l = 90.149.308,32 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

² Rota 2: 23 navios x 46,29d = 1.064,67 d/a; Logo, 1.064,67 d/a x 312 ton/dia x 6,77% (n. contêiners reefers) = 22.488,39 ton. combustível/ano; Consumo em litros: 22.488,39 ton.comb./ano x 1000 (ton. para kg) dividido por 0,853 kg/l = 26.363.880,42 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

³ Rota 3: 6 navios x 41,42d = 248,52 d/a; Logo, 248,52 d/a x 312 ton/dia x 6,77% (n. contêiners reefers) = 5.249,34 ton. combustível/ano; Consumo em litros: 5.249,34 ton.comb./ano x 1000 (ton. para kg) dividido por 0,853 kg/l = 6.153.974,21 litros de combustível pesado por ano para o transporte de carne bovina no mar.

Tabela L2. Tempo de viagem dos portos da América em estudo até os quatro principais portos da China que recebem carne bovina.

Rotas	Porto de Xangai			Porto de Ningho-Zhoushan			Porto de Qingdao			Porto de Tianjin		
	Distância		Tempo de viagem	Distância		Tempo de viagem	Distância		Tempo de viagem	Distância		Tempo de viagem
	milhas náuticas	km		milhas náuticas	km		milhas náuticas	km		milhas náuticas	km	
Porto de Santos	11.056	20.476	46d,02h	10.166	18.827	42d,09h	11.285	20.900	47d,01h	11.581	21.448	48d,06h
Porto de Paranaguá	11.111	20.578	46d,07h	10.221	18.929	42d,14h	11.340	21.002	47d,06h	11.636	21.550	48d,12h
Porto de Iquique	9.940	18.409	41d,10h	10.762	19.931	44d,20h	9.950	18.427	41d,11h	10.140	18.779	42d,06h

1 milha náutica = 1,852 km.

Velocidade 10 nós = velocidade 18,52 km/h.

Simulado por <https://sea-distances.org/>

Apêndice M. Dados resultantes da simulação em cada cenário desenvolvido.

Abaixo são apresentados os dados para cada cenário baseados em uma variação na quantidade de carne exportada em cada rota logística de exportação.

A Tabela M1 mostra os dados para alcançar os resultados mostrados no 'Quadro resumo dos cenários', Tabela 15.

Os dados anuais da Tabela abaixo foram posteriormente divididos pela quilometragem das rotas logísticas de exportação (para obter dados em km-ano) e, posteriormente, divididos pela quantidade de carne exportada para a China (para obter dados em km-ton.carne). Esses dados são utilizados para calcular os indicadores. O procedimento de cálculo foi detalhado nos métodos para todos os indicadores, e é apresentado nos resultados para o indicador energia, no Apêndice I para o indicador emissões de CO₂, no Apêndice H para os custos e tempo de viagem do trecho rodoviário e no Apêndice L para os custos e tempo de viagem do trecho marítimo.

Tabela M1. Dados resultantes da simulação da quantidade de carne exportada em cada cenário.

Tabela III: Dados resultantes da simulação da quantidade de carne exportada em cada cenário.													
Rotas	Unidade	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
		Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Operação rodoviária													
aço	kg/ano	2.09E+08	5.90E+07	1.56E+07	8.94E+07	8.94E+07	8.94E+07	1.05E+08	2.95E+07	1.34E+08	4.18E+07	5.90E+07	1.67E+08
diesel	l/ano	1.48E+07	4.32E+06	2.57E+06	6.33E+06	6.55E+06	1.47E+07	7.40E+06	2.16E+06	2.21E+07	2.96E+06	4.32E+06	2.76E+07
mão de obra	pessoas/ano	3.92E+04	1.11E+04	2.92E+03	1.68E+04	1.68E+04	1.68E+04	1.96E+04	5.53E+03	2.51E+04	7.84E+03	1.11E+04	3.14E+04
Operação marítima													
aço	kg/ano	3.66E+07	1.06E+07	2.78E+06	1.57E+07	1.57E+07	1.57E+07	1.85E+07	5.56E+06	2.36E+07	7.41E+06	1.06E+07	2.92E+07
diesel	l/ano	9.01E+07	2.64E+07	6.15E+06	3.88E+07	3.90E+07	3.49E+07	4.56E+07	1.38E+07	5.23E+07	1.83E+07	2.64E+07	6.46E+07
mão de obra	pessoas/ano	1.03E+03	2.99E+02	7.80E+01	4.42E+02	4.42E+02	4.42E+02	5.20E+02	1.56E+02	6.63E+02	2.08E+02	2.99E+02	8.19E+02

Operação rodoviária

Aço: À medida que a quantidade de carne é simulada ou variada para cada cenário, a quantidade de veículos e equipamentos na operação também muda, provocando uma alteração no consumo de aço;

Diesel: consumo de combustível por veículo (Apêndice H; Tabela H8); total de diesel por rota vezes número de caminhões.

Mão de obra: um motorista por caminhão

Operação marítima

Aço: À medida que a quantidade de carne é simulada ou variada para cada cenário, o número de veículos e equipamentos na operação também muda, causando uma mudança no consumo de aço.

Diesel: consumo de combustível por embarcação (Apêndice K); Total de diesel por rota multiplicado pelo número de embarcações.

Mão de obra: 13 tripulantes por embarcação