

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Jonathan Barros Felipe Vieira

**PLANEJAMENTO TÁTICO INTERMODAL PARA A MAXIMIZAÇÃO
DO LUCRO NO TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE GRÃOS**

Santa Maria, RS
2024

Jonathan Barros Felipe Vieira

**PLANEJAMENTO TÁTICO INTERMODAL PARA A MAXIMIZAÇÃO
DO LUCRO NO TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE GRÃOS**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

Santa Maria, RS
2024

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Vieira, Jonathan Barros Felipe
Planejamento Tático Intermodal para a Maximização do Lucro no Transporte e Armazenagem de grãos / Jonathan Barros Felipe Vieira.- 2024.
65 p.; 30 cm

Orientador: Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2024

1. Transporte 2. Produção I. Neuenfeldt Júnior, Alvaro Luiz II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, JONATHAN BARROS FELIPE VIEIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Jonathan Barros Felipe Vieira

**PLANEJAMENTO TÁTICO INTERMODAL PARA A MAXIMIZAÇÃO
DO LUCRO NO TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE GRÃOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovada em 02 de fevereiro de 2024:

Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior, Dr. (UFSM)

Olinto César Bassi de Araújo, Dr. (UFSM)

Paula Donaduzzi Rigo, Dra. (UFRGS)

Vanessa Teresinha Alves, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2024

RESUMO

PLANEJAMENTO TÁTICO INTERMODAL PARA A MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO DO TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE GRÃOS

AUTOR: Jonathan Barros Felipe Vieira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

A elevada produção de grãos no Brasil demanda um sistema de transporte eficiente, capaz de entregar os produtos no tempo e local adequados, sob condições aceitáveis. Entretanto, para alcançar a eficiência no transporte de grãos, é imperativo realizar um planejamento intermodal. Além do transporte, a armazenagem estática é uma atividade crucial na logística de grãos, dado que o Brasil não possui capacidade estática suficiente para armazenar toda a produção de grãos, o que exige um planejamento intermodal que integre silos de armazenamento, terminais de transbordo e portos. Assim, considerando tanto o transporte quanto a capacidade estática dos grãos, a pesquisa visa propor um planejamento intermodal que maximize o lucro da venda. Logo, foi realizada uma revisão da literatura, focando na identificação dos fatores técnicos logísticos e nas estruturas da rede intermodal. Com base na revisão da literatura, foi elaborado um grafo intermodal que representa o planejamento da pesquisa, incorporando o mapeamento das vias de transporte de carga e as decisões logísticas dos produtores e gestores de cooperativas. A etapa seguinte envolveu o desenvolvimento de um modelo matemático que maximiza o lucro, considerando custos de transporte, armazenagem e perdas de grãos, tanto em períodos de safra quanto de entressafra. O modelo foi então aplicado a um estudo de caso no estado do Rio Grande do Sul, abrangendo as dez maiores cidades produtoras de soja, seis armazéns, dois terminais de transbordo e um porto para movimentar aproximadamente 1,5 milhões de toneladas de grãos. Os resultados do caso de estudo indicaram que a intermodalidade e a armazenagem de grãos proporcionaram maior lucro, embora acompanhado de custos elevados de transporte e armazenagem, além de maiores perdas de grãos devido ao uso do modal rodoviário entre os nós intermediários. A partir dos resultados, foi proposta uma rota intermodal para o transporte de grãos, especificando a quantidade a ser transportada e armazenada em cada período. Em última análise, a rota proposta pela pesquisa contribui para a tomada de decisões dos profissionais envolvidos na logística de grãos, facilitando o planejamento do transporte e promovendo maior rendimento na venda de grãos.

Palavras-chave: Intermodalidade, Grãos, Transporte, Armazenagem, Otimização.

ABSTRACT

TACTICAL INTERMODAL PLANNING FOR THE MAXIMIZATION OF GRAIN TRANSPORT AND STORAGE PROFIT

AUTHOR: Jonathan Barros Felipe Vieira
ADVISOR: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

The high grain production in Brazil demands an efficient transportation system capable of delivering products at the right time and place, under acceptable conditions. However, to achieve efficiency in grain transportation, it is imperative to conduct intermodal planning. In addition to transportation, static storage is a crucial activity in grain logistics, as Brazil lacks sufficient static capacity to store the entire grain production. This necessitates an intermodal planning that integrates storage silos, transshipment terminals, and ports. Thus, considering both transportation and static capacity of grains, the research aims to propose an intermodal planning that maximizes sales profit. A literature review was conducted, focusing on identifying technical logistics factors and intermodal network structures. Based on the literature review, an intermodal graph representing the research planning was developed, incorporating the mapping of cargo transport routes and logistical decisions made by producers and cooperative managers. The next step involved developing a mathematical model that maximizes profit, considering transportation, storage costs, and grain losses, both during harvest periods and off-seasons. The model was then applied to a case study in the state of Rio Grande do Sul, covering the ten largest soy-producing cities, six warehouses, two transshipment terminals, and a port to handle approximately 1.5 million tons of grains. The case study results indicated that intermodality and grain storage provided higher profits, albeit accompanied by higher transportation and storage costs, as well as increased grain losses due to the use of road transport between intermediate nodes. Based on these results, an intermodal route for grain transport was proposed, specifying the quantity to be transported and stored in each period. Ultimately, the route proposed by the research contributes to decision-making for professionals involved in grain logistics, facilitating transport planning and promoting higher yields in grain sales.

Keywords: Intermodali, Grains, Transport, Storage, Optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	8
1.2	OBJETIVO	9
1.3	JUSTIFICATIVA	9
1.3.1	Perspectivas relacionadas a produção e transporte de grãos	9
1.3.2	Contexto científico	11
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
2.1	DELINEAMENTO E CENÁRIO DE PESQUISA	14
2.2	ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	15
2.3	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1	ESPECIFICAÇÕES DA REDE	22
3.2	ELEMENTOS DAS MODELAGENS MATEMÁTICAS	25
4	ESTRUTURAÇÃO DA REDE INTERMODAL	30
5	MODELO MATEMÁTICO	32
6	RESULTADOS	36
6.1	GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS	36
6.2	USABILIDADE DO MODELO MATEMÁTICO	38
6.2.1	Análise 1: Lucro	38
6.2.2	Análise 2: Custo do transporte	40
6.2.3	Análise 3: Custo do armazenamento	42
6.2.4	Análise 4: Perda de grãos	43
6.3	ROTA DO PLANEJAMENTO INTERMODAL DE GRÃOS	45
7	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A: PÁGINAS DO QUESTIONÁRIO DA PESQUISA	60
	APÊNDICE B: CARACTERIZAÇÃO DAS REDES INTERMODAIS	63
	APÊNDICE C: RESULTADO DO QUESTIONÁRIO DA PESQUISA	65

1 INTRODUÇÃO

Os grãos alimentícios são a base da cadeia alimentar de qualquer país, mas nem todos os países conseguem suprir a própria demanda com a produção interna. Por conta da relação desequilibrada entre a produção e a demanda de grãos, o mercado internacional no século XX focou no aumento da manufatura de grãos em processos industriais e no avanço científico na área agrícola, o que potencializou a genética dos grãos e uma evolução agrícola em vários países (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; RAY *et al.*, 2013; KLANOVICZ; MORES, 2017).

A partir da evolução da tecnologia agrícola foi viabilizado um aumento na produção de grãos em países que não eram destaque agrícola, o que possibilitou uma maior disponibilidade do produto no mercado internacional. De acordo com Mogale *et al.* (2018), a comercialização dos grãos permitiu um abastecimento dos complexos agroindustriais devido à versatilidade dos grãos em relação a produção de alimentos. Segundo dados da USDA (2023), os maiores abastecedores de grãos (milho, trigo, arroz e soja) são os EUA, Brasil, China, Austrália, Índia e a Argentina.

A alta produção de grãos em um país possibilita a comercialização do excedente agrícola, gerando receita para toda a cadeia produtiva (CEPEA, 2023). Atualmente, um dos grãos mais consumidos mundialmente é a soja, sendo o Brasil e os EUA países destaques por produzirem juntos aproximadamente 70% do total mundial. Na safra de 2021/22 a produção mundial foi de 380 milhões de toneladas de soja, na qual o setor agrícola brasileiro produziu 153 milhões de toneladas de soja, rendendo R\$ 333 bilhões de reais, o que corresponde a 4% do PIB brasileiro (ABN, 2023). Porém, para o pleno escoamento da produção os sistemas de transporte intermodal devem ser planejados para a movimentação dos grãos na cadeia produtiva, desde a área de produção até o mercado internacional (LIU; STEFANOVISH; KAEWUNRUEN, 2021). Em Tavares (2005) afirmou que um planejamento intermodal competente viabiliza a comercialização dos produtos através dos elos da cadeia de suprimentos de grãos de forma eficiente, assim, o planejamento intermodal se torna uma ferramenta essencial para as operações logística dos grãos.

De acordo com Crainic e Laporte (1997), o planejamento intermodal em geral pode ser dividido em três níveis: Estratégico; Tático; Operacional. O nível estratégico aborda decisões sobre investimento em infraestrutura do transporte, sendo o investimento aplicado no estudo da localização de *hubs* ou terminais de cargas (STEADIESEIFI *et al.*, 2014; MUNIM;

HARALAMBIDES, 2018; OSORIO-MORA *et al.*, 2020). O nível tático apresenta pesquisas que estudam o dimensionamento da frota e a otimização da rota através do uso do modal, itinerário das entregas, frequência e capacidade dos veículos (BIERWIRTH *et al.*, 2012; ELBERT; MÜLLERY; RENTSHCLER, 2020; ALOUI *et al.*, 2021; HARKS *et al.*, 2016). E o nível operacional aborda o tempo de carregamento, flexibilização e dinâmica das rotas de entrega com foco em maximizar a confiabilidade do serviço de entrega (CRAINIC; LAPORTE, 1997; SONG; DONG, 2012; QU *et al.*, 2019).

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Sob o contexto do planejamento intermodal em nível tático, o uso concentrado de um único modal em conjunto com desequilíbrio da matriz de transporte e a falta de um planejamento logístico eficiente e otimizado correspondem a um aumento de 15% do custo logístico no transporte de grãos (BALLOU, 2006). Além do aumento do custo, a falta do planejamento dos transportes causa perda de soja durante a entrega, no Brasil a perda de soja é de 1,30 g/T do volume carregado nos veículos transportadores, para fins de comparação nos EUA a perda é de 0,8 g/T (JÚNIOR; NETO, 2022). A falta de um planejamento tático intermodal eficiente também afeta o setor de armazenagem da soja, pois o gerenciamento do transporte da soja colhida não encontra locais disponíveis para o armazenamento devido à falta de capacidade estática. Logo, a soja que precisaria ser inicialmente armazenada é comercializada durante a época de safra, na qual tem um preço menor se comparado ao período de entressafra, o que reduz os ganhos financeiros das empresas (COELHO; MARJOTTA-MAISTRO, 2017).

Para reduzir as perdas de grãos ocasionadas pela ineficiência do gerenciamento do transporte e da armazenagem é preciso desenvolver um planejamento intermodal que não só diminua os desperdícios de tempo e de custo, mas também otimize os processos logísticos das cooperativas de grãos e dos produtores. Dessa forma, o desenvolvimento do planejamento intermodal propôs um equilíbrio entre o lucro da venda de grãos e o mapeamento de rotas alternativas, considerando as combinações modais de transporte, a alocação eficiente de grãos nos armazéns sob o aumento do faturamento e redução do custo do transporte. Assim, o desenvolvimento do planejamento tático intermodal deve proporcionar uma alta atratividade do preço de venda dos grãos, além de auxiliar a empresa em obter retornos financeiros mais lucrativos nas comercializações com os clientes.

Portanto, o problema de pesquisa abordado é: Como a intermodalidade pode contribuir para o desenvolvimento do planejamento tático de uma rede de transportes de grãos?

1.2 OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo propor um planejamento tático intermodal para maximizar a lucratividade das vendas de grãos.

Logo, os objetivos específicos são:

- a. Elaborar uma rede intermodal baseado em uma rede de transportes;
- b. Desenvolver uma modelagem matemática considerando os custos de transporte e armazenagem, além da perda de grãos em uma rede intermodal;
- c. Aplicar a modelagem matemática em um caso prático.

1.3 JUSTIFICATIVA

Na presente seção, argumentos sobre aspectos sociais e econômicos em um panorama sobre a utilização dos modais no transporte de cargas são apresentados. A seguir, o contexto científico sobre planejamento intermodal para aumentar o lucro da venda e reduzir o custo do transporte de cargas é descrito.

1.3.1 Perspectivas relacionadas a produção e transporte de grãos

A produção em larga escala de grãos ocorreu devido ao aumento da população e da aplicação dos derivados de grãos na agropecuária (AMARAL, 2009). A partir da crescente demanda mundial e do avanço científico no setor agrícola, os grãos tornaram-se o recurso primordial para adquirir receitas e abastecer o mercado internacional (ZEMOLIN, 2013).

No Brasil o avanço científico no setor agrícola possibilitou na safra de 2020/21 cerca de 153 milhões de toneladas de soja em uma área de 43 mil hectares (CONAB, 2023a). Para mapear a produção de grãos no país é perceptível que os estados com as maiores produções na safra de 2021/22 são: Mato Grosso com 28% da produção nacional da soja; Paraná com 13%; Goiás com 11%; Rio Grande do Sul 10% e Mato Grosso do Sul 8%, totalizando assim 70% da produção nacional (EMBRAPA, 2023).

Por conta da alta produção de grãos no território brasileiro, o país tem uma participação de protagonista na exportação de grãos (USDA, 2023). Das 153 milhões de

toneladas produzidas, cerca de 93 milhões foram destinadas à exportação e 60 milhões de toneladas foram consumidas nacionalmente (CONAB, 2023a). Segundo os dados fornecidos pelo MAPA (2020) a produção e o consumo da soja sofrerão um aumento de 35% nos próximos 10 anos, resultando em uma produção de 185 milhões de toneladas de soja.

Para transportar os grãos produzidos com destino ao mercado internacional, o país precisa de uma infraestrutura de transporte que proporciona uma entrega de grãos eficiente e de baixo custo (LIU; STEFANOVISH; KAEWUNRUEN, 2021). O transporte é o movimento de bens ou pessoas de um ponto para o outro, e normalmente representa o elemento mais importante em termos de custos logísticos, pois pode absorver até dois terços dos custos logísticos (BALLOU, 2006). Para o transporte de cargas podem ser usados cinco modais, sendo os modais rodoviário, ferroviário, aquaviário, aeroviário e dutoviário (RODRIGUES, 2008). A escolha e a combinação dos modais depende do tipo de serviço empregado para o transporte de cargas, sendo a combinação dos modais um meio de obter o menor custo do transporte para entregas de longas distâncias e proporcionar um maior lucro.

A matriz de transporte brasileira de grãos é composta majoritariamente pelo modal rodoviário, sendo o deslocamento de produtos semiprontos ou acabados transportados por caminhões em um trajeto de até 500 km, as vantagens do rodoviário são a flexibilidade de vias e de acesso, frequência, disponibilidade, velocidade e comodidade inerentes ao serviço porta-a-porta, mas não tem grandes capacidades de cargas (BALLOU, 2006). A concentração da utilização do modal rodoviário representa 61% da matriz de transporte brasileira, ao contrário de países que utilizam a intermodalidade em larga escala, como o caso da China e dos EUA que utilizam 35% e 46% das matrizes de transporte pelo modal rodoviário, respectivamente (CNA, 2020).

O ferroviário é o segundo modal mais utilizado para transportar grãos no Brasil, pois oferece baixo custo operacional, pontualidade e baixo impacto ambiental além de ser recomendado para grandes volumes de cargas e distâncias superiores a 500 km (BALLOU, 2006). O modal ferroviário ocupa 21% da matriz de transporte do Brasil, sendo que nos EUA o modal ocupa 23% do transporte de carga (CNA, 2020). Já o transporte hidroviário caracteriza-se por utilizar rios, lagos e oceanos no deslocamento de cargas (CNT, 2013). A maior vantagem do modal hidroviário é a redução dos valores nos custos unitários por tonelada, sendo assim o modal mais recomendado para entregas de grandes volumes de cargas em longas distâncias (ARNOLD, 1999; CHOPRA; MEINDL, 2011). De acordo com CNA (2020) o modal hidroviário ocupa 2% da matriz de transporte brasileira e a cabotagem 12%,

sendo que na China o modal hidroviário é responsável por movimentar cerca de 23% das cargas.

Além do transporte, a armazenagem é um setor de grande importância para o planejamento intermodal, pois os grãos que não são armazenados precisam ser transportados para as regiões portuárias. Logo, os grãos não armazenados são comercializados durante o período de safra, na qual tem uma atratividade do preço de venda menor se comparado ao período de entressafra (MAIA *et al.*, 2013). No Brasil, o armazenamento de grãos ou capacidade estática é de 166,5 milhões toneladas, no entanto, o setor de armazenagem não consegue acomodar a produção de 153 milhões de soja, pois os armazéns precisam estocar outros grãos como o milho e o arroz (CONAB, 2023). Em suma, a falta de capacidade estática no país obriga os grãos a serem transportados diretamente para o mercado internacional, o que resulta em uma redução da atratividade do preço de venda.

1.3.2 Contexto científico

Os artigos sobre o planejamento do transporte intermodal, com base no roteamento e distribuição de carga pelos modais rodoviário, ferroviário, hidroviário e aeroviário, apresentam agrupamentos relacionados a análise do tempo de entrega e a estrutura de redes. A análise de tempo do planejamento intermodal apresenta estruturas de redes estática, em que o tempo de entrega e de operação não é considerado (LEE *et al.*, 2014; BAYKASOĞLU; SUBULAN, 2016; ABBASSI; ALOUI; BOUKACHOUR, 2019; AMBROSINO; SCIOMACHEN, 2021), e estruturas de rede dinâmica, objetivando minimizar o tempo de entrega entre a origem e a demanda (AGBO *et al.*, 2017; HU *et al.*, 2018; TAWFIK; LIMBOURG, 2019). As estruturas de redes dinâmicas focam no planejamento intermodal sob uma janela de tempo para a entrega de cargas. As estruturas de redes dinâmicas estão relacionados ao horário de saída dos veículos, quadro de horários e ao tempo de carga e descargas.

Além da análise temporal, o planejamento tático do transporte intermodal pode ser separado em duas estruturas de rede, o desenho de rede de serviço (SND) e o problema de fluxo em rede (FNP). O desenho de rede de serviço é uma construção da rede de transporte e pode apresentar fatores técnicos logísticos do planejamento intermodal como ligação entre os nós, disponibilidade dos veículos, localização dos terminais de carga e de transbordo, além de conter informações reais como tempo e custo do transbordo. A aplicação do desenho de rede

de serviço pode ser vista em Bierwirth *et al.* (2012) na qual projeta uma rede intermodal de cargas para facilitar o planejamento do transporte intermodal, que considera limitações de fluxo e de tempo. Em Crainic *et al.* (2015) um desenho de rede de serviço para o transporte intermodal de contêineres em portos seco foi desenvolvido, estabelecendo uma condição de tempo de entrega baseado na intensidade esperada do tráfego.

Já a FNP representa uma rede de transporte que foca somente no transporte de cargas pela rede, sem adotar nenhum fator técnico logístico, além de apresentar modelos matemáticos com menos limitações de planejamento de entrega de cargas. Assim, o uso da FNP é visto em Palagin, Mochalov e Timotin (2014), na qual apresentam uma rede de transporte real para transportar cargas por três modais no leste da Rússia, considerando a localização real dos terminais de carga e das linhas áreas que atendem os terminais. Em Norlund e Gribkovskaia (2015) existe um compartilhamento de cargas entre caminhões e barcaças em uma rede composta por rotas reais entre os portos da Noruega.

O agrupamento dos artigos permite observar a localização em que as pesquisas foram conduzidas, sendo predominante a intermodalidade próxima a regiões portuárias e hidrovias. Na Ásia, a China, Vietnã e Tailândia foram as localizações mais exploradas. Em Hei *et al.* (2014), a região econômica de Bohai na China apresenta uma rede composta por 6 portos chineses ligados a uma extensa via rodoviária e ferroviária, a rede é utilizada para transportar as cargas que chegam do ocidente com destino a China e ao interior da Ásia. Além disso, Kaewfak, Ammarapala e Huynh (2021) realizou um planejamento intermodal utilizando as vias intermodais de transporte da Tailândia para o transporte de carvão.

No contexto europeu o foco foi o desempenho do transporte tanto de um país quanto de uma macroregião, devido a extensa rede europeia de transporte intermodais que interliga terminais e países. Em Baykasoğlu e Subulan (2016) a rede intermodal interliga a Suécia e a Croácia pelo modal ferroviário, em conjunto com o modal hidroviário no mar Mediterrâneo para entregar cargas na Turquia. Em Demir *et al.*, (2019) a rede intermodal explorada está situada próximo ao rio Elba, com grande fluxo de cargas e contêineres entre a região portuária de Roterdã e a Áustria. A rede é composta por terminais de carga e de transbordo localizado na Alemanha e República Tcheca.

Nos EUA a rede de transporte rodoviário e ferroviário é extensa, assim, em Ke e Verma (2021) uma rede de transporte localizada a sudeste dos EUA foi estruturada, composta por ferrovias, rodovias e principalmente pelo rio Mississippi. Uddin e Huynh, (2016, 2019) mostra o fluxo de cargas nos terminais de carga e transbordo localizados entre as cidades de

Atlanta, Memphis, Miami e Dallas. Os terminais e a rede de transporte intermodal do sudeste norte-americano se localizam próximos ao porto de Nova Orleans, por onde passam grandes quantidade de cargas contêineres e granéis.

Assim, é visto que as pesquisas relacionadas ao planejamento intermodal ocorrem em maior parte no leste Asiático, no continente europeu e no EUA, o que viabiliza pesquisas em países pouco explorados como o Brasil. Além da concentração geográfica das pesquisas, os agrupamentos também descrevem diferentes tipos de estruturas de rede que ajudam a atender à demanda através das várias configurações de rede. A Seção 3 desta pesquisa fornece uma descrição mais detalhada de como as estruturas de rede podem atender à demanda.

Por fim, o planejamento intermodal otimiza a movimentação de cargas ao mesmo tempo que desempenha um papel crucial na busca por práticas mais sustentáveis. Ao combinar modais mais ecoeficientes, como o transporte ferroviário e hidroviário, a intermodalidade pode contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono associadas ao transporte de carga. Além disso, a diversificação dos modos de transporte promove uma maior eficiência energética, reduzindo a dependência excessiva do modal rodoviário, que é frequentemente mais poluente. A integração sinérgica entre modais não apenas aprimora a eficiência da cadeia logística, minimizando tempos de espera e otimizando rotas, mas também alinha as operações de transporte com metas ambientais, destacando a importância da intermodalidade como uma ferramenta para impulsionar a sustentabilidade no transporte de cargas.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente seção apresenta o delineamento metodológico para a condução da pesquisa, constituindo-se por três seções. A Seção 2.1 descreve o delineamento e cenário da pesquisa. Já a Seção 2.2 trata da classificação metodológica da pesquisa. Por fim, a Seção 2.3 explana todas as etapas da pesquisa.

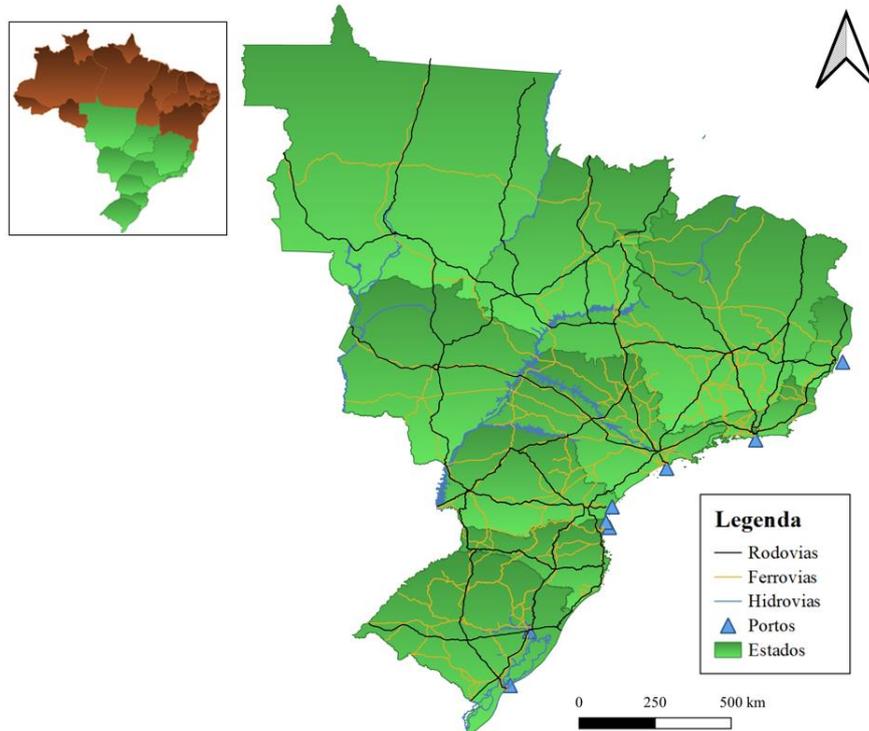
2.1 DELINEAMENTO E CENÁRIO DE PESQUISA

O desenvolvimento do planejamento tático intermodal requer a identificação das redes de transportes que serão usadas para a construção da rede intermodal. Assim, para o planejamento tático intermodal foi realizado um mapeamento dos corredores logísticos do Brasil, sendo os corredores logísticos compostos por vias da rede de transportes usados para o escoamento dos grãos. Para construir a rede intermodal a partir das vias de escoamento de grãos foi elaborado o mapa da Figura 1, que apresenta a rede de vias dos transportes presentes no país. Para o mapeamento das vias foram usadas informações dos órgãos que monitoram a produção e o transporte de grãos, como a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Na representação da rede está contido os principais eixos rodoviários, a rede de ferrovias e as hidrovias usadas para o transporte de grãos.

Os corredores logísticos mais usados para o escoamento de grãos são o corredor sudeste, formado principalmente pelos portos de Santos (SP) e Tubarão (ES), acessado pelas vias hidrovias Tietê-Paraná, malha ferroviária RMP (Rumo Malha Oeste), RCA (Ferrovia Centro Atlântica) e RMS (Maior Rede de Ferrovias da América Latina) e pelas rodovias BR-374, BR-050, BR-373, BR-153, BR-456, BR-262. Já o corredor sul é formado pelos portos de Rio Grande (RS), Porto Alegre (RS), São Francisco do Sul (SC) e Paranaguá (PR), acessado pelas rodovias BR-285, BR-302, BR-116, BR-471, BR-470, BR-277, pelas empresas ferroviárias RMS e Rumo América Latina Logística (Ruma ALL), e pela hidrovia Lagoa dos Patos (CNA, 2021). No entanto, todos os corredores logísticos citados contêm vias ineficientes que dificultam o escoamento da soja. Logo, por conta da ineficiência, existe a necessidade de reduzir o custo do transporte de grãos através de um planejamento intermodal e, conseqüentemente, aumentar o faturamento sob a venda de grãos. Já o corredor Norte não

foi incluso na rede intermodal, pois o cenário focou nos corredores logísticos que passam pelos maiores produtores de grãos.

Figura 1 – Cenário da pesquisa



Fonte: Autor (2024)

2.2 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

No desenvolvimento de uma pesquisa científica existem diferentes formas de classificar a pesquisa com relação à tipologia da pesquisa, sendo a classificação composta pelos seguintes critérios: finalidade, abrangência temporal, objetivo, natureza, procedimento técnico, local de realização e dados (GIL, 2002; MARCONI; LAKATOS, 2017; PEREIRA, 2019). No Quadro 1 estão os tipos de pesquisa existentes aplicados.

Quadro 1 –Tipologia de pesquisa

Finalidade	Abrangência Temporal	Objetivos	Natureza	Procedimento Técnico	Local de Realização	Dados
Básica	Longitudinal	Explicativa	Qualitativo Quantitativo	Bibliográfica Prático	Laboratório	Primário Secundário

Fonte: Autor (2024)

Para a pesquisa foi determinada que a finalidade é classificada como básica, pois as informações obtidas serão usadas para desenvolver um modelo matemático que maximize o

lucro do transporte e da armazenagem de grãos. Já a abrangência temporal é longitudinal, pois é preciso entender a evolução das pesquisas sobre o planejamento intermodal ao longo dos últimos dez anos de pesquisa. Para entender a evolução das pesquisas sobre o planejamento de grãos foi realizado uma revisão da literatura, além disso, o objetivo escolhido foi o explicativo, pois é preciso identificar os elementos dos métodos de otimização usados pela revisão da literatura, que podem ser usados na modelagem da pesquisa.

Para a natureza foi escolhido tanto aspecto qualitativo quanto quantitativo, pois o aspecto qualitativo é encontrado na descrição das funções dos elementos da modelagem matemática identificados na revisão da literatura, e para o aspecto quantitativo foram obtidas estruturas de rede que corroboram no planejamento tático intermodal. Já o local de realização ao ambiente foi em um ambiente controlado, pois permitiu um desenvolvimento mais eficiente do modelo matemático. Por fim, para os tipos de dados foram considerados os primário e secundários, sendo os dados primários obtidos na construção da rede de transporte e dos modelos matemáticos, e os dados secundários obtidos por pesquisa realizada por outros autores.

2.3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

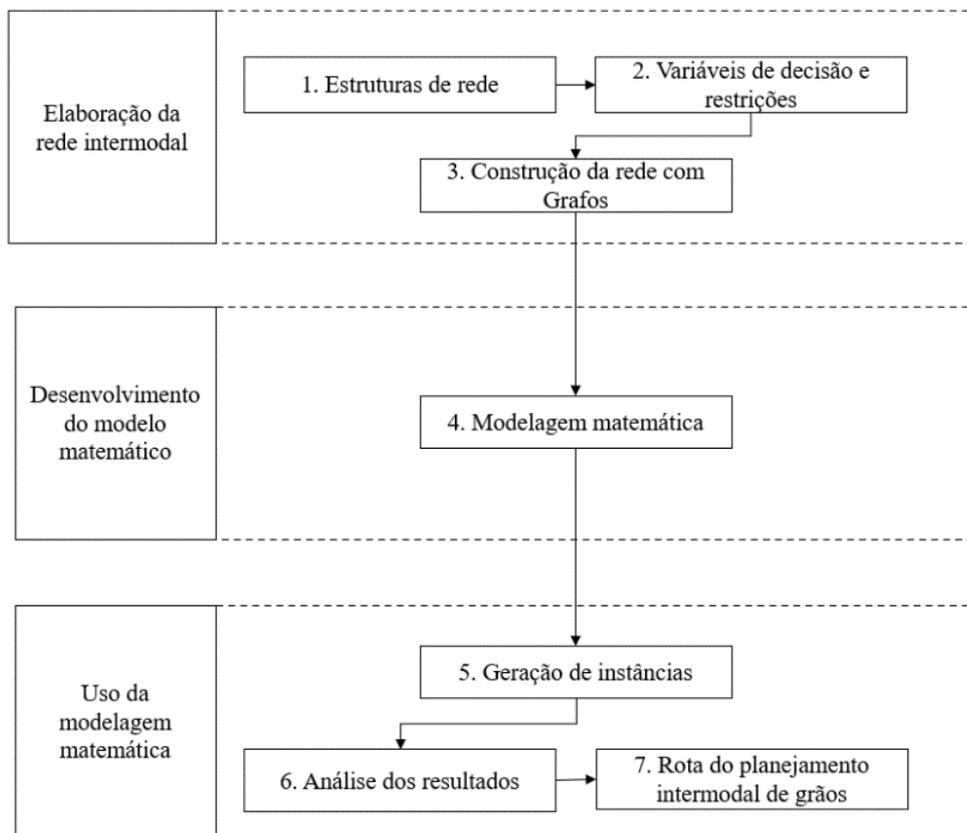
Nessa seção são descritas as 7 etapas da pesquisa estruturadas na Figura 2, na qual visam descrever a evolução da pesquisa e descrever os métodos usados.

A Etapa 1 corresponde à análise das estruturas de rede intermodal, por meio de artigos obtidos com a condução de uma revisão da literatura desenvolvida para ampliar o conhecimento sobre o planejamento do transporte intermodal. Os fatores técnicos do planejamento do transporte intermodal são alocados na rede para o funcionamento da logística de grãos, na qual são citados como exemplo a quantidade de carga, os custos do transporte, o tempo de operação e as emissões de poluentes (Steadieseifi et al., 2014). Assim, a descrição dos fatores técnicos mais usados na construção das redes intermodais visa o equilíbrio entre o lucro da venda de grãos e o uso dos modais do transporte.

Dessa forma, o protocolo de pesquisa selecionou os artigos referentes ao planejamento do transporte intermodal, sendo o protocolo de pesquisa baseado nas revisões de literatura propostas em Tranfield e Denyerandsmart (2003), Jones (2004) e Page et al. (2021). Para encontrar artigos referentes às lacunas de pesquisa identificadas, três fases foram conduzidas: (a) Definição das questões de pesquisa; (b) processo de busca; (c) seleção dos artigos. A fase

definição das questões de pesquisa serve para nortear a revisão de literatura. Para tanto, na presente pesquisa um total de três questões foram elaboradas: (Q1) Quais são as características dos artigos referente a especificações da rede intermodal, tipo de combinação modal e em que lugares os estudos foram aplicados?; (Q2) Quais as variáveis de decisão e restrições elaboradas pelos artigos que foram usadas nas formulações matemáticas e os softwares utilizados para a solução dos modelos que planejaram o transporte intermodal de carga?; (Q3) Quais as análises dos artigos referente ao planejamento intermodal e aos elementos dos modelos matemáticos?

Figura 2 - Etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2024)

A seguir, na fase de processo de busca, a base de dados SCOPUS foi escolhida para a condução da busca de artigos para responder às três questões de pesquisa. A base de dados foi escolhida pois é uma plataforma com pesquisas multidisciplinares que foram publicados em *journals* internacionais de alto impacto. Logo, para a seleção dos artigos na plataforma foi usado uma *string* com os termos “*commodity transport* OR grain transport* OR freight transport* OR plan*multimodal transport* OR plan*intermodal transport* OR combined*

transport OR flow network problem OR routing network problem OR distribution problem OR planningtransport* network OR optimization cost AND (plan* OR network)",* além da exclusão do termo “*urban*”, relacionada a problemas de logística urbana dado o escopo da presente pesquisa. Em adição, somente artigos em inglês, não duplicados, publicados em *journals* entre os anos de 2012 e 2022 foram selecionados. O intervalo de tempo escolhido mostra a necessidade de verificar os artigos publicados mais atuais e recentes sobre o transporte de carga intermodal, conduzidas entre os meses de janeiro e maio de 2023, restando um corpus textual inicial de 1.945 artigos. A partir da seleção dos artigos através da leitura do título e do abstract foram identificados 451 artigos relacionados ao planejamento tático intermodal.

Logo, os seguintes critérios foram usados para a estratificação do corpus textual a partir da leitura completa dos artigos: (a) Apresentação da rede do transporte intermodal; (b) uso de dois ou mais modais de transporte; (c) foco no mapeamento de rotas do transporte de carga e não em localização de instalações ou operações de carga e descarga; (d) adoção de modelagens matemáticas; (e) implementação de métodos determinísticos para resolução das modelagens matemáticas. Assim, após a leitura completa dos artigos foram selecionados 47 artigos diretamente relacionados aos critérios propostos, estabelecidos como o corpus textual da presente revisão de literatura. Por fim, a revisão possibilitou a análise da estrutura de rede intermodal, na qual proporcionou a compreensão das características básicas de uma rede intermodal, sendo as características da rede usadas para modelar a rede intermodal da pesquisa. Posteriormente, na Etapa 2 foram identificadas e tabuladas as variáveis de decisão e as restrições dos modelos matemáticos obtidos na revisão da literatura, tomando como principais referências as pesquisas desenvolvidas em Elbert, Müllery e Rentshcler (2020) e Steadieseifi *et al.* (2014).

Na Etapa 3 foi estruturado um grafo a partir do mapeamento da rede do transporte e da armazenagem em conjunto com as estruturações de redes verificadas na literatura, além das informações obtidas do questionário. Assim, o mapeamento da rede de transportes e dos armazéns, através do software de geoprocessamento Sistema de Informações Geográficas (QGIS), identificou as principais vias dos modais de transporte que são utilizadas para o transporte de grãos. Dessa forma, o mapeamento contribuiu para identificar e selecionar os modais de transporte, a origem e o destino do planejamento intermodal dos grãos que foram implementados no grafo.

O grafo foi estruturado com base nas abordagens de Rudi *et al.* (2016), Ke e Verma (2021) e Crainic *et al.* (2015). As abordagens interligavam os nós de origem e destinos através de vértices que representam os modais de transporte. Além de estabelecer a estrutura o grafo com os nós e vértices, também foram incorporados fatores técnicos orientadores da logística das cargas, como capacidade dos veículos, tempo de operação, capacidade dos terminais e fluxo de carga. Assim, nesta pesquisa, os nós que representam as regiões produtoras, o armazenamento em silos, os terminais de transbordo e os polos portuários foram interligados por vias dos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. Além disso, os fatores técnicos contribuíram para constituir a logística de grãos, podendo ser citados a capacidade dos veículos, a capacidade estática dos silos, quantidade de grãos de transportados e armazenados e quantidades perdidas. Em suma, a literatura contribuiu para estruturar a forma do grafo e identificar os fatores técnicos que foram usados na criação da rede.

Para a elaboração do grafo foram selecionados também os dados acerca do transporte e da armazenagem dos grãos, na qual foram obtidos através de um questionário aplicado de forma remota a especialistas do transporte e armazenagem de grãos (Apêndice A). Logo, o questionário obteve respostas de 3 produtores agrícolas, na qual produzem, colhem e transportam os grãos, e de 2 gestores de cooperativas de grãos, na qual gerenciam o armazenamento e o transporte de grãos para produtores que terceirizam o serviço logístico.

Assim, para os produtores foram elaboradas questões sobre a cidade onde os grãos são colhidos, a quantidade de soja produzida na última safra, o tamanho da área semeada, a modalidade do transporte utilizado para o escoamento dos grãos, se o transporte é próprio ou terceirizado, preço médio e preço máximo a ser pago pelo transporte, utilização e localização dos terminais de transbordo, perdas e atrasos. Ainda, os destinos dos grãos foram também questionados, além de identificar a época em que o maior volume de transporte ocorre, potenciais problemas e custos de armazenagem.

As questões aos gestores de cooperativas são semelhantes as questões dos produtores, mas focaram em operações de armazenagem, como localização da cooperativa, capacidade estática dos silos, custo médio de armazenagem, quantidade de grãos perdidos durante a armazenagem, possibilidade de redistribuição dos grãos entre os armazéns, época de escoamento, destinos dos grãos, tipo e custo do transporte, utilização de terminais de transbordo, mudança de destinos dos grãos por conta da falta de capacidade estática dos silos e problemas comuns que ocorrem no armazenamento dos grãos. Por fim, os dados obtidos

pelos especialistas auxiliaram na alocação dos fatores técnicos que foram implementados no grafo.

Com base na elaboração do grafo, a modelagem matemática na Etapa 4 foi desenvolvida e implementada no software Zimpl e resolvida pelo solver CPLEX v.20.1.0.0. A função objetivo está orientada em maximizar o lucro da venda de grãos, sujeita as restrições como quantidade de grãos alocados nos veículos durante os períodos, estoque inicial, movimentação do fluxo de grãos e capacidade estática dos armazéns, além de estabelecer limites para perdas de grãos durante o transporte até o destino. Todas as informações usadas para desenvolver o modelo matemático e as restrições foram levantadas ao longo da revisão da literatura, sendo as variáveis de decisão do modelo matemático relacionadas a quantidade de grãos transportados dos produtores para os outros nós, quantidade de grãos transportada entre armazéns, terminais de transbordo e portos, quantidade de grãos perdidos durante o transporte e quantidade de grãos que foram armazenados. As restrições consideram limites na capacidade dos veículos, do estoque e perda de grãos.

A modelagem matemática está proposta com base em uma Programação Linear (PL) que maximiza o lucro da venda dos grãos, considerando o custo do transporte, custo de armazenagem e as perdas de grãos. No entanto, o modelo foi configurado para fornecer resultados que condizem com a realidade, logo o ajuste foi realizado para tornar possível o transporte intermodal e o armazenamento de grãos com um fluxo capaz de ser vendido no período de maior valorização.

Na Etapa 5 as instâncias sobre o uso da intermodalidade e do armazenamento de grãos foram geradas para testar a usabilidade do modelo matemático proposto. Dessa forma, para a geração das instâncias o questionário aplicado aos especialistas foi usado como referência, na qual proporcionou informações acerca do uso da intermodalidade e do armazenamento. Além disso, o questionário e o mapeamento contribuíram para estabelecer o local do caso de estudo da pesquisa. Os dados de entrada como quantidade de grãos utilizados para a pesquisa, preço de venda, custo do transporte e do armazenamento e porcentagem de perdas foram fundamentadas em informativos de órgãos governamentais e pelos dados do questionário aplicado aos especialistas.

A Etapa 6 apresenta a análise dos resultados obtidos com o uso das instâncias geradas no modelo matemático, sendo dividida de acordo com as parcelas da função objetivo, como análise do lucro, análise do custo do transporte, análise do custo do armazenamento e análise de perdas de grãos. Por conseguinte, a análise do lucro descreve o fluxo de grãos que foram

vendidos nos períodos da safra e entressafra. Em seguida o custo transporte relata a instância que apresentou o maior custo e a maior quantidade de grãos transportados entre os nós. Já a análise do custo do armazenamento informa a quantidade de grãos que foram armazenados até o período de venda mais propício. E a análise da perda de grão aborda sobre o valor e a quantidade de grão perdidos durante o transporte.

A Etapa 7 apresenta o planejamento intermodal de grãos para os casos representados nas instâncias geradas. Assim, a partir da análise dos resultados foi possível elaborar uma rota de transporte de grãos que compreende o destino, armazenamento, e quantidade de grãos distribuída entre os períodos determinados. A apresentação da rota de transporte facilita a tomada de decisão dos produtores e dos gestores de cooperativas na área de transporte e armazenamento de grãos, além de indicar qual o momento mais propício da venda de grãos considerando a capacidade dos armazéns, dos terminais de transbordo e dos portos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da literatura está dividida em duas subseções. A Seção 3.1 descreve as estruturas de rede que foram usados no planejamento intermodal dos artigos e a Seção 3.2 descreve as variáveis de decisão e as restrições usadas nos modelos matemáticos.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DA REDE

As especificações de rede apresentam fatores comuns, sendo a ligação dos modais por meio de terminais de transbordo o fator mais usado nas redes intermodais, como pode ser visto em Qu *et al.* (2019), Demir *et al.* (2019), Ambrosino e Sciomachen (2021), na qual terminais de transbordo são usados para elaborar possíveis rotas de transporte de cargas. De acordo com Wang *et al.* (2020b), quanto mais rotas possíveis para o transporte de cargas forem analisadas, mais vias de escoamento e custo do transporte podem ser obtidas. Em específico, Pan, Ballot e Fontane (2013) mostra que a divisão das roteirizações em sub-rotas pode colaborar com uma análise mais precisa das possíveis rotas de transporte de cargas.

Além dos fatores comuns, as estruturas de rede também apresentam fatores complementares, sendo os fatores complementares: limitação de fluxo de cargas em links ou nós (BAYKASOĞLU; SUBULAN, 2016; WOLFINGER; TRICOIRE; DOERNER, 2019) a utilização da janela de tempo para as entregas da carga (DEMIR *et al.*, 2019; RIESSEN *et al.*, 2015); a interrupção de um link ou nó (KE; VERMA, 2021; BARKER; NICHOLSON, 2019) e/ou a adoção de métodos qualitativos para a escolha da rota (KAEWFAK; AMMARAPALA; HUYNH, 2021; HE *et al.*, 2012). Os fatores complementares podem não só promover a redução do custo através da sincronização modal e do tempo disponível para realizar as entregas, mas também pode descrever o comportamento dos modais e do fluxo quando um link ou nó é limitado, ou auxiliar até mesmo na seleção de uma rota de transporte de cargas a partir de dados qualitativos.

O planejamento intermodal pode ser influenciado pela limitação de fluxo de cargas, sendo a limitação do fluxo orientado pela restrição do número de veículos em rede e pelo fluxo de cargas. Ao limitar o número de veículos pode ser necessário aumentar o número de viagens de cada veículo, o que conseqüentemente demanda um aumento na utilização do veículo e uma maior dependência do modal, conforme verificado em Norlund e Gribkovskaia (2015), em que o número de caminhões na estrada em relação a um menor compartilhamento

de carga com o modal hidroviário é verificado. Além disso, Özpeynirci, Üçer e Tabaklar (2014) estabelece um número máximo de veículos a serem utilizados no transporte de cargas e compara com o uso dos modais rodoviário e hidroviário na Turquia, assim como verificado para uma rede intermodal do Reino Unido em Rudi *et al.* (2015).

Em comparação, a limitação do fluxo de rede pode causar um aumento de atividade nas operações dos terminais para transbordar ou armazenar as cargas, o que dificulta o planejamento e eleva o custo do transporte por conta da distância percorrida até os terminais que apresentam uma menor movimentação de carga. A limitação do fluxo de rede é verificada em Baykasoğlu e Subulan (2016), sendo a análise fundamentada no comportamento dos modais em relação ao limite de peso permitido nas estradas da Europa. A limitação nas vias é também explorada em Zhao *et al.* (2020), em que o volume de cargas em diferentes modais é limitado, e por Wolfinger, Tricoire e Doerner (2019), onde o uso de caminhões por dia foi limitado, impondo um número máximo de horas do uso dos veículos terrestres, mas não levando em consideração o tempo de espera dos veículos nos terminais.

Outro fator complementar é a adoção da rede intermodal dinâmica que pode ser modelada considerando o horário de saída e de entrega dos veículos, como em Agbo *et al.* (2017), onde a minimização do custo, do tempo de partida e de entrega de contêineres cheios e vazios transportados pelos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário foi analisada. Em Crainic *et al.* (2015) o tempo de transporte entre os terminais é a variável mais importante no planejamento tático intermodal. Para a modelagem da rede, nós temporais entre os terminais podem servir para reduzir o custo e o tempo de entrega. Em Hei *et al.* (2014) um planejamento intermodal considerando os horários fixos de saída dos trens e dos navios foi realizado. Já em Hu *et al.* (2018) uma rede intermodal considerando a capacidade dos veículos em conjunto com os horários de liberação de entrega também foi explorada.

O desenvolvimento de um quadro de horário entre as entregas pode resultar na sincromodalidade, o que proporciona uma rede mais restrita e com menos probabilidade de ser otimizada. A sincromodalidade pode ser vista em Demir *et al.* (2019) através do tempo de partida, de transbordo e de movimentação sob uma janela de entrega disponível para promover a sincronização modal. Riessen *et al.* (2015) mostra a coordenação do uso dos modais para transporte de contêineres dos terminais de transbordo para o porto de Roterdã, objetivando a ordenação do uso dos modais semanalmente para reduzir o número de dias de atraso. Já em Tawfik e Limbourg (2019) a demanda dos terminais portuários foi atendida com

um itinerário com a quantidade mínima de cargas para a entrega, sendo o itinerário uma descrição da entrega que orienta o uso dos modais durante o transporte das cargas.

A rede intermodal dinâmica também pode apresentar outras especificações temporais, como a adoção do tempo de carga e descarga no planejamento intermodal de carga. O tempo de carga e descarga interfere diretamente na janela de tempo das entregas quando atrasos são verificados. A influência das operações de carga e descarga no planejamento intermodal pode ser visto em Lee *et al.* (2014) através da influência do tempo de carga e descargas nas operações portuárias. Semelhantemente, Qu *et al.* (2019) avaliou o planejamento intermodal através da análise da capacidade de seis terminais portuário com base no custo, capacidade de carga e tempo de carga e descarga.

O planejamento intermodal pode incorporar a minimização da emissão de poluentes a partir da concentração de CO₂ emitido na atmosfera pelos modais e terminais de transbordo. Em Heinold e Meisel (2020) um limite de emissão de poluentes tanto para os links quanto para os terminais de transbordo foi definido. Já em Pan, Ballot e Fontane (2013) a emissão de poluente em três partes da rede foi verificada, sendo a primeira parte composta pelo link entre o fornecedor das cargas e o terminal de transbordo, a segunda parte comportando o link entre os terminais de transbordo, e a terceira parte verificando a emissão dos poluentes entre o último terminal de transbordo e o nó de destino.

Outras especificações da rede podem ser realizadas com a ativação e desativação de agentes da rede intermodal como a interrupção dos terminais de transbordo e terminais de carga, links, combinação modal e rotas. Ke e Verma (2021) mostra o comportamento dos outros terminais de cargas e dos modais quando o terminal de Atlanta processa parcialmente as cargas. A análise em Darayi, Barker e Nicholson (2019) verificou a minimização do custo do transporte quando a atividade do nó ou do link é interrompido, e em Uddin e Huynh (2016) foi verificado o comportamento dos modais quando as atividades do terminal de transbordo ou fluxo em uma via é interrompido.

Por fim, os fatores complementares da rede intermodal podem também ser analisados de forma qualitativa. O dimensionamento da rota em Kaewfak; Ammarapala e Huynh (2021) considerou a preferência dos stakeholders na seleção das rotas, sendo a preferência sujeita a atribuição de notas dos stakeholders em relação aos riscos operacionais e financeiros que a via pode oferecer. Um método multicritério foi usado para converter as notas em valores quantitativos, sendo os valores introduzidos em uma modelagem matemática para encontrar a rota preferencial. Similarmente, em He *et al.* (2012) fatores qualitativos foram convertidos em

variáveis de decisão através do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Para localização das pesquisas e detalhes das redes intermodais ver o Quadro 3 localizado no Apêndice B.

3.2 ELEMENTOS DAS MODELAGENS MATEMÁTICAS

As variáveis de decisão e as restrições são usadas na modelagem matemática para maximizar o lucro e reduzir o custo do transporte intermodal. As variáveis de decisão fornecem informações quantitativas acerca do planejamento intermodal de cargas, as variáveis de decisão podem ser referentes a quantidade de carga transportada, a ativação do uso modal de transporte ou o número de veículos utilizados. Já as restrições são especificadas para representar as limitações das funcionalidades do planejamento intermodal de cargas, tais como a capacidade do veículo e do link, limite de tempo, emissão de poluentes ou a frequência do modal. As variáveis de decisão e as restrições obtidas dos artigos podem ser observados na Quadro 2.

Quadro 2 – Variáveis de decisão e restrições das modelagens matemáticas

Artigo	Variáveis de decisão	Restrições
Bierwirth et al. (2012)	- Fluxo de cargas pela rede (contínua) - Número de veículos utilizados (inteiro) - Ativação do modal de transporte com condição (binário)	Restrição sobre o uso do modal ferroviário, conservação do fluxo, número de vagões carregados, número de vagões disponíveis
He et al. (2012)	- Fluxo de cargas (contínua)	Conservação do fluxo, capacidade dos terminais
Pan, Ballot e Fontane (2013)	- Fluxo de mercadoria (contínua) - Link utilizado no transporte (binário) - Mercadoria emitida pelo nó (binária) - Mercadoria recebida pelo nó sucessor	Fluxo total do produto em um único segmento, conservação do fluxo, seleção de terminais atribuídos aos centros de distribuição
Hei et al. (2014)	- Fluxo de cargas (inteiro)	Demanda atendida, tempo de serviço, capacidade dos veículos
Lee et al. (2014)	- Fluxo de cargas total (contínua) - Custo do transporte (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário)	Conservação do fluxo, limite inferior e superior da taxa de serviço, não-negatividade da taxa de serviço
Özpeynirci, Üçer e Tabaklar (2014)	- Fluxo de cargas (contínua) - Ativação do modal (binário) - Frequência da embarcação (inteiro)	Conservação do fluxo, frequência do modal, capacidade dos nós, janela de tempo, tipo de veículo, número de veículos
Palagin, Mochalov e Timotin (2014)	- Fluxo de cargas (contínua) - Tempo de entrega (contínua)	Conservação do fluxo, fluxo de cargas limitados no dia
Crainic et al. (2015)	- Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do serviço modal (binário)	Conservação do fluxo, capacidade do link, número de serviços no link, número de veículos no terminal, janela de tempo para carga e descarga
Norlund e Gribkovskaia (2015)	- Volume da carga por rodoviário (contínua) - Volume da carga por hidroviário (contínua) - Número de veículos (inteiro)	Janela de tempo, capacidade de veículos em um nó, número de veículos, continuidade do fluxo de cargas por hidrovia
Riessen et al. (2015)	- Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Janela de tempo (contínua)	Conservação do fluxo, capacidade do link, número de atrasos, número de serviços

Rudi et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Dias de atraso (contínua) - Número de serviços (inteiro) - Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário) 	Conservação do fluxo, equilíbrio do ponto de transbordo, limite para tempo e emissão, utilização de outro modal por meio da análise do fluxo mínimo
Wang et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo movimentado pelo arco (contínua) - Total do fluxo intermodal (contínua) - Número de veículos (inteiro) 	Conservação do fluxo, capacidade dos veículos, capacidade do nó, número de veículo utilizado, limite de distâncias
Baykasoğlu e Subulan (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Quantidade exportada por modal (inteira) - Quantidade importada por modal (inteira) - Número de veículos (inteiro) 	Demandas atendidas no período de tempo, capacidade de veículos, conservação do fluxo, capacidade dos portos, número de veículos
Behdani et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de contêineres pela rede (contínuo) - Ativação do modal de transporte (binário) - Tempo de transporte e operação (contínua) 	Capacidade por dias ou por semanas; restrição por fluxo, tempo de carregamento, tempo de partida, tempo de espera, tempo de atraso, tempo de chegada; número de serviço de um modal; dias não operacionais do modal
Uddin e Huynh (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de cargas (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário) 	Conservação do fluxo, janela de tempo, capacidade dos veículos, satisfação da demanda
Agbo et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Número de contêineres utilizados (inteiro) - Contêineres cheio e vazios (inteiro) - Número de veículos (inteiro) 	Limite de emissão de carbono, equilíbrio entre oferta e demanda, capacidade do nó, relação entre n° de veículos e quantidade de contêineres (cheio e vazio)
Zhang e Pel (2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do serviço modal (binário) 	Conservação do fluxo, atendimento da demanda, proibição de atalhos irrealis
Fazayeli e Kamakabadi (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de cargas pela rede (contínua) - Ativação do modal de transporte (binária) - Tempo de chegada (contínua) - Atraso do veículo (binário) - Saída imediata do veículo (binário) 	Conservação do fluxo, cliente atribuído a um terminal, cliente atribuído a um veículo, capacidade dos veículos, saída definitiva do veículo após a chegada do veículo no terminal, janela de tempo, horário de chegada, atrasos
Hu et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de contêineres (inteiro) - Fluxo de contêineres planejados no ferroviário (inteiro) - Fluxo de contêineres carregados no ferroviário (inteiro) - Número de veículos (inteiro) - Tempo de atraso do ferroviário (binário) 	Conservação do fluxo, conservação do número de veículos, saída adianta dos veículos, capacidade do terminal, contêineres planejados e carregados, capacidade mínima do veículo, tempo de saída do veículo
Tawfik e Limbourg (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxos de cargas com pedágio (contínua) - Fluxo de cargas sem pedágio (contínua) 	Conservação do fluxo
Abbassi, Aloui e Boukachour (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do terminal de transporte (binário) 	Conservação do fluxo, capacidade dos terminais, ativação do terminal de transbordo
Darayi, Barker e Nicholson, (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de cargas pela rede (contínua) - Satisfação da demanda (binário) 	Capacidade do link, não conservação do fluxo, redução do consumo final por conta demanda não satisfeita
Demir et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de cargas pela rede (contínua) - Tempo de chegada e partida (contínua) - Fluxo de cargas entre serviços (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário) 	Tempo de partida, tempo de viagem, tempo de transbordo, emissão de CO2
Liu et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de contêineres (contínua) 	Conservação do fluxo, capacidade dos links e dos nós
Qu et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de mercadoria pela rede 	Custos variáveis proporcionais com o volume

	(contínua) - Reprogramação do horário de partida (inteiro)	transportada, penalidade no tempo de entrega
Tawfik e Limbourg (2019)	- Fluxo de cargas (contínua) - Ativação do serviço de entrega (contínua) - Frequência de envio em uma semana (inteiro)	Conservação do fluxo, capacidade dos links, pedido mínimo de entrega
Wolfinger, Tricoire e Doerner (2019)	- Tempo da entrega (inteiro) - Frequência do modal (inteiro) - Quantidade transbordada (inteiro) - Ativação do transporte intermodal (binário)	Conservação do fluxo, janela de tempo, tempo de operação máxima, capacidade do veículo, número de veículos, sincronização, quebra de simetria
Uddin e Huynh (2019)	- Fluxo de cargas por modal (contínua) - Ativação do serviço intermodal (binário) - Satisfação da demanda (inteiro)	Conservação do fluxo, janela de tempo, capacidade dos veículos, satisfação da demanda
Akgün et al. (2020)	- Número de veículos (contínua)	Capacidade do trem e do veículo, número de caminhões e de trens enviados, criação de nós fictícios para um armazenamento temporário do produto, janelas de tempo
Heinold e Meisel (2020)	- Emissão de poluentes (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário) - Alocação da carga útil (binário) - Emissão de poluentes (binário)	Conservação do fluxo, utilização do transbordo, emissão de poluentes
Huang, Lee e Xu (2020)	- Peso da mercadoria (contínua) - Peso máximo do container (binário) - Mercadoria atribuído ao contêiner (binário) - Ativação do modal de transporte (binário)	Atribuir item ao contêiner, capacidade do contêiner, peso total do contêiner, controle da estocagem do contêiner
Wang et al. (2020)	- Ativação do transporte intermodal (binário)	Capacidade do veículo, continuidade da rota, n° de rotas, unimodalidade entre dois nós, risco da rota multimodal
Zhao et al. (2020)	- Fluxo de volume da carga pela rede (contínua)	Volume de carga por modais terrestres
Ambrosino e Sciomachen (2021)	- Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário)	Conservação do fluxo, Capacidade dos nós e dos arcos, restrição do uso do nó por causa do não uso do terminal
Hosseini e Al Khaled (2021)	- Fluxo de contêineres pela rede (contínua) - Ativação do modal de transporte (binário)	Capacidades dos terminais, número de serviços por veículo, número de veículos, eliminações de sub-rotas, capacidade do link
Kaewfak, Ammarapala e Huynh (2021)	- Desvio dos fatores atribuídos no método AHP (contínua) - Ativação da rota de transporte (binário)	Custo e tempo definido pelo usuário, limite de desvio dos fatores estabelecido pelo usuário
Ke e Verma (2021)	- Fluxo movimentado pelo arco (inteiro) - Número de veículos (inteiro) - Ativação do modal de transporte (binário); - Fluxo movimentado pelo arco (inteiro) - Número de veículos (inteiro)	Capacidade dos terminais, capacidade de envio e recebimento

Fonte: Autor (2024)

A variável de decisão de fluxo de cargas e a restrição conservação do fluxo são as mais comuns para a modelagem matemática do transporte intermodal. Em He *et al.* (2014) a interação dos dois parâmetros proporcionou um planejamento intermodal, o que permitiu a conservação do fluxo de cargas pela rede e estabeleceu uma condição de equilíbrio entre oferta e demanda sem perdas de cargas durante o transporte. Em complemento, a variável de

fluxo de cargas foi usada para informar a quantidade de carga transportada até o destino. Também, Rudi *et al.* (2015) descreve a interação entre a restrição conservação do fluxo com a variável de fluxo de carga pela rede, acrescentando a variável binária de ativação do modal de transporte para dimensionar o uso do transporte intermodal.

As variáveis de decisão de tempo, como por exemplo tempo de chegada e de partida, janela de entrega, atraso, em conjunto com as restrições temporais podem auxiliar na construção de um planejamento intermodal com janelas de entrega (BEHDANI *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2018; QU *et al.*, 2019; UDDIN; HUYNH, 2019) ou limites no tempo de operação de carga e descarga (FAZAYELI; KAMAKABADI, 2018; DEMIR *et al.*, 2019; AKGÜN; ÖZKIL; SELÇUK, 2020). Em Hu *et al.* (2018) o planejamento intermodal dinâmico contemplou uma janela de entrega para efetuar o transporte de cargas entre os terminais de carga. Caso a janela de entrega não seja atendida, multas para compensar a falta de planejamento devem ser aplicadas. Para tanto, a variável binária atraso do veículo é usada para identificar os veículos atrasados devido a congestionamentos nas vias ou a concentração de entregas em um terminal de cargas. Em Demir *et al.* (2019), as variáveis de tempo de chegada fornecem informações acerca do horário que um veículo pode chegar no terminal de transbordo ou no terminal portuário. Já a variável de decisão tempo de partida pode promover informações sobre o horário de saída do veículo, podendo restringir o tempo de viagem necessário para realizar a entrega. Em Riessen *et al.* (2015) a variável de dias de atraso informa o período de atraso do veículo para realizar a entrega, assim a variável de tempo de atraso pode informar se a carga ultrapassou o tempo disponível da janela de entrega em que o nó de destino determina como aceitável.

A variável de emissões de poluentes representa a quantidade de gases poluentes emitidos pelo modal. Em Heinold e Meisel (2020) um planejamento intermodal contém uma restrição para limitar a emissão de gases poluentes por modal, verificada pela variável contínua “concentração de CO₂” e uma variável binária de emissão para mostrar se a restrição é atendida. Em Agbo *et al.* (2017) um limite de emissão de poluentes para o transporte de contêineres cheios e vazios foi estabelecido. Já em Rudi *et al.* (2015) um limite de tempo e de emissão para realizar o transporte intermodal foi estabelecido, podendo o equilíbrio entre tempo e a emissão ser afetado pela escolha do modal e pela janela de entrega.

A relação entre a variável de decisão de capacidade do veículo e a restrição capacidade de nó ou terminal de transbordo pode informar o número de vezes que um veículo é usado para transportar uma carga de um nó para o outro. Tal relação é vista em Ke e Verma (2021),

na qual o número de veículos pesados e vagões necessário para transportar as cargas de um nó para outro é determinada, pois a capacidade do terminal de transbordo ou do terminal de carga limita o uso dos modais responsáveis por transportar cargas. De forma semelhante, Akgün, Özkil e Selçuk (2020) revela que a variável de decisão número de veículo foi usada para dimensionar uma frota de veículos a realizar entrega em locais temporários de armazenamento. Os locais temporários possibilitam uma redistribuição do fluxo de cargas com o intuito de descongestionar os terminais de transbordo.

Outro conjunto de variáveis é encontrado em Huan, Lee e Xu (2020), considerando as características dos contêineres como o peso atual e o peso máximo. A característica dos contêineres foi usada na modelagem matemática sob a justificativa de analisar a operação de entrega nos modais de transporte, sendo que a análise das características dos contêineres pode minimizar o custo do transporte, pois os contêineres mais leves podem ser transportados pelo modal rodoviário, demandando menos combustível para realizar a entrega das cargas.

Portanto, a relação entre variáveis de decisão e restrições pode transformar um planejamento intermodal em uma modelagem matemática, sendo os valores das variáveis de decisão do transporte intermodal uma referência para a gestão das entregas de cargas, pois os valores auxiliam no dimensionamento do fluxo de cargas, uso e capacidades de veículos, redução da emissão de CO₂ e tempo de entrega. Por outro lado, as restrições limitam o problema através de parâmetros como tempo, emissão, fluxo de cargas no link e nós para atender as preferências dos tomadores para reduzir o custo do transporte intermodal.

4 ESTRUTURAÇÃO DA REDE INTERMODAL

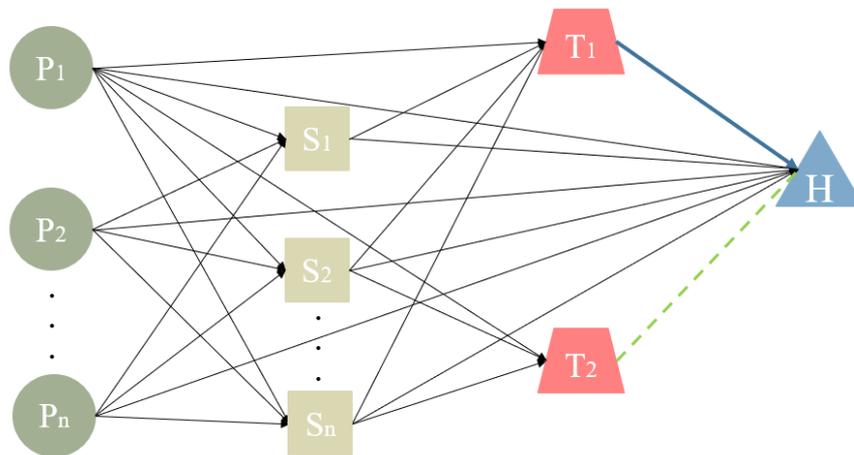
De acordo com as informações obtidas com a aplicação do questionário detalhado no Apêndice A, foram obtidas respostas de 3 produtores e 2 gestores de cooperativas. Assim, os produtores informaram que produziram cerca de 200 mil toneladas de grãos em campos com mais de 100 hectares. Para o transporte de grãos foi utilizado somente o modal rodoviário por conta do custo e da disponibilidade, o que resulta em não utilizar a intermodalidade. Além disso, os produtores afirmaram que a maior parte dos grãos são transportados no período de entressafra com destino aos armazéns. Para o armazenamento de grãos são escolhidos armazéns próprios dos produtores, e que não ocorre mudança no destino da rota por conta de falta de capacidade estática dos silos ou por causa do custo do armazenamento. Em relação as respostas dos gestores de cooperativas, foi informado que a capacidade estática dos silos varia entre 18 mil à 72 mil toneladas, e o tempo médio de carregamento e descarregamento de um veículo pesado de 38t é de uma hora. É relevante destacar que ocorre a redistribuição de grãos entre os armazéns, pois não é possível armazenar toda a produção de grãos, o que resulta em um transporte de grãos na época de safra e entressafra. Além disso, o transporte de grãos para os principais destinos como portos e indústrias é realizado por frotas terceirizadas, tanto no modal rodoviário quanto no modal ferroviário. Contudo, os destinos podem ser alterados por conta da falta de capacidade estática dos armazéns ou por conta da perda de grãos. Para consulta das respostas individuais do questionário ver Quadro 4 no Apêndice C.

Assim, com base nas informações logísticas do questionário, mapeamento das vias e estruturas de rede da literatura foi estruturado um grafo $G(V,A)$. Dessa forma, a literatura e o mapeamento das vias auxiliariam na elaboração dos nós (V) e das arestas (A), sendo os nós os produtores (P) e os portos (H), além de adicionar nós intermediários como armazéns (S) e terminais de transbordo (T) (Figura 3). Por conseguinte, os vértices direcionados realizam a conexão entre nós, e na rede G os vértices em preto representam transporte rodoviário, o vértice azul o modal hidroviário e o vértice tracejado o modal ferroviário. De acordo com a revisão da literatura o grafo G é um SND estático, pois apresenta serviços na rede intermodal e não apresenta tempo de transporte, somente tempo de armazenagem.

Foram utilizadas também para a estruturação do grafo as informações obtidas pelo questionário, na qual estabeleceram delineações da pesquisa como: (i) Sem limite de número de veículo a cada quinzena; (ii) selecionar um dos dois terminais de transbordo, sendo um terminal para o hidroviário e o outro para o ferroviário; (iii) o produtor e os armazéns podem

transportar os grãos diretamente para o porto pelo modal rodoviário; (iv) o intervalo de tempo selecionado para análise é por quinzena durante os períodos de safra e entressafra, pois a armazenagem de grãos é calculada a cada 15 dias. No entanto, uma delimitação aplicada ao grafo diferiu dos resultados obtidos no questionário, destacando-se o item (v) referente à não adoção do processo de redistribuição de grãos entre armazéns e terminais de transbordo. A adoção do delineamento foi estabelecida pois a redistribuição de grãos requer um modelo matemático mais sofisticado para otimizar o transporte entre os nós.

Figura 3 – Grafo da rede intermodal



Fonte: Autor (2024)

O planejamento intermodal de grãos visa maximizar o lucro no grafo G . Portanto, foi atribuído o valor C_i representa o custo do armazenamento, já C_m refere ao custo de transporte de cada modal, V_q representa o valor da venda dos grãos em uma quinzena e L_m a quantidade perdida de grãos que o modal proporciona. Para representar o fluxo de grãos pela rede, a variável de decisão $x_{(i,j)mq}$ é usada, e a variável de decisão y_{iq} representa a quantidade de grãos vendida no porto, considerando as perdas que ocorreram durante o transporte e o transbordo. Já a variável de decisão I_{iq} representa o estoque inicial dos nós durante as quinzenas, e, por fim, a variável de decisão $l_{(i,j)mq}$ representa a perda de grãos durante o transporte.

5 MODELO MATEMÁTICO

Para o modelo matemático, um problema intermodal em programação linear abrangendo múltiplos períodos foi formulado, sendo que cada período q representa uma quinzena. Logo, o modelo matemático proporciona um planejamento intermodal que fornece um maior lucro de acordo com a variação do preço de venda de grãos ao longo do ano. Além disso, o modelo contempla a combinação dos nós sem repetição, o que resulta em um transporte de grãos em sentido único dos nós produtores para outros nós independentemente do modal escolhido. O modelo apresenta uma movimentação fluxo de grãos sob influência das capacidades dos terminais e das perdas do transporte.

A seguir são mostrados os principais parâmetros do modelo matemático proposto:

- P : Conjunto de índices dos produtores;
- A : Conjunto de índices dos armazéns;
- T : Conjunto de índices dos terminais de transbordo;
- H : Conjunto de índices dos portos;
- Q : Conjunto de índices das quinzenas;
- M : Conjunto de índices dos modais;
- I : Conjunto de índices de todos os nós, $P \cup A \cup T \cup H$;
- \hat{I} : Conjunto de tuplas (i, j) , $I \times I$;
- \hat{IMQ} : Conjunto de tuplas (i, j) , $I \times I \times M \times Q$;
- IQ : Conjunto de tuplas (j, i) , $I \times I \times Q$;
- PQ : Conjunto de tuplas (i, q) , $I \times Q$;
- V_q : Valor de venda no período q ;
- Z_{iq} : Produção de grãos no nó i na quinzena q ;
- C_m : Custo do modal m ;
- $d(i, j)$: Distância do nó i para o nó j ;
- c_i : Custo do armazenamento no nó i ;
- L_m : Quantidade de grãos perdido via modal m ;
- UB_m : Capacidade do modal m na quinzena q ;

As variáveis de decisão foram definidas para quantificar o total de grãos transportados, armazenados, vendidos e perdidos em cada etapa do transporte, mostradas a seguir:

$x(i, j), m, q$: Quantidade transportada de i para j via modal m no período q ;

$y(i, q)$: Quantidade de grãos vendido dos nós i no período q ;

$I(i, q)$: Estoque inicial dos nós i no período q ;

$l(i, j), m, q$: Perda de grãos no transporte de i para j via modal m no período q ;

Para a função objetivo (1) o lucro do planejamento intermodal de grãos é maximizado levando em consideração o custo dos modais dos transportes adotados, tempo de armazenagem dos grãos e as perdas de grãos durante o transporte. Assim, a primeira parcela da função objetivo é maximizada de acordo com a atratividade do preço de venda dos grãos. Na segunda parcela, o custo do transporte dos modais diminui a maximização do lucro, pois o transporte de grãos é uma atividade que proporciona custo a uma empresa agrícola. Além disso, a maximização do lucro é também influenciada pelo custo do armazenamento, pois os grãos precisam ser armazenados e transportados para o porto quando o preço se tornar mais atrativo. Contudo, o lucro pode ser mais afetado dependendo da quantidade de tempo que os grãos precisam ser armazenados. Na última parcela da função objetivo é quantificado o valor de venda perdido de acordo com a quantidade de grãos extraviados durante o transporte, sendo a perda de grãos proporcionado de acordo com o uso modal.

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i \in P} \sum_{q \in Q} v_q y_{i,q} - \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} c_m d_{(i,j)} x_{(i,j),mq} \\ & - \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} c_o I_{i,q} - \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} v_q l_{(i,j),mq} \end{aligned} \quad (1)$$

A restrição (2) limita o fluxo de grãos pela capacidade do modal m para cada quinzena q , o que proporciona um número fixo de veículos utilizados durante as quinzenas. Para determinar o número fixo de veículos em quase todos os períodos, foi necessário dividir a produção agrícola entre as 8 quinzenas da safra, pois a divisão da produção agrícola é uma estratégia adotada pelos produtores para não proporcionar congestionamento de veículos pesados nos armazéns, terminais de transbordos e porto, além de realizar uma colheita programada nas áreas de plantio.

$$\sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} x_{(i,j),mq} \leq U b m_m \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall q \in Q^* \quad (2)$$

As restrições (3-5) tratam do estoque inicial I dos nós i e da quantidade armazenada e expedida durante as quinzenas q . Para o modelo matemático foi definido uma capacidade estática disponível para o armazenamento dos grãos para cada nó i nas quinzenas q . A capacidade estática dos armazéns, terminais de transbordos e porto definiu um limite para o fluxo de grãos ser armazenado durante as quinzenas. Assim, quando limite da capacidade estática fosse atingindo os grãos precisariam ser transportados para outro armazém. As restrições em questão não permitem a redistribuição de grãos entre armazéns e nem entre terminais de trasbordo.

$$I_{i,q} = I_{i,q-1} + z_{i,q} - \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} x_{(i,j),mq} \quad \forall i \in P, \forall q \in Q^* \quad (3)$$

$$I_{i,q} = I_{i,q-1} + \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} L_m x_{(i,j),mq} - \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} x_{(i,j),mq} \quad \forall i \in A \cup T, \forall q \in Q^* \quad (4)$$

$$I_{i,q} = I_{i,q-1} + \sum_{(i,j) \in \hat{I}} \sum_{m \in M} \sum_{q \in Q} x_{(i,j),mq} - y_{i,q} \quad \forall i \in H, \forall q \in Q^* \quad (5)$$

A restrição (6) calcula a perda de grãos l através do índice de perda de grãos dos modais, sendo calculado a partir do uso do modal do transporte e não a partir da distância. A perda de grãos informa o quanto se deixou de lucrar no momento de venda dos grãos, logo, ao estabelecer rotas com diferentes quantidades de perdas o produtor e o gestor de cooperativa podem escolher a rota que impacta menos no faturamento dos grãos.

$$L_m x_{(i,j),m,q} \leq l_{(i,j),m,q} \quad \forall (i,j) \in \hat{I}, \forall m \in M, \forall q \in Q^* \quad (6)$$

E, por fim, as restrições (7-10) definam as variáveis de decisão, que retratam a quantidade de grãos ao sair dos nós produtores, ao chegar e sair dos armazéns e dos terminais de transbordo, além da quantificar e perda de grãos. O valor fornecido pelas variáveis de decisão informa qual a quantidade de grãos que precisa ser transportada ao destino certo e em qual período deve realizar o transporte. Além disso, também informam sobre a quantidade que deve ser armazenada e enviada até o porto de destino.

$$x_{(i,j),m,q} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in \hat{I}, \forall m \in M, \forall q \in Q^* \quad (7)$$

$$y_{h,q} \geq 0 \quad \forall h \in H, \forall q \in Q^* \quad (8)$$

$$I_{(i,j),m,q} \geq 0 \quad \forall (j,i) \in \hat{I}, \forall m \in M, \forall q \in Q^* \quad (9)$$

$$0 \leq l_{i,q} \leq UB_{i,q} \quad \forall i \in I, \forall m \in M, \forall q \in Q^* \quad (10)$$

Em resumo, a estruturação do grafo contribuiu para o desenvolvimento do modelo matemático, na qual definiu as variáveis de decisão como números contínuos para quantificar o fluxo de grãos. Além disso, o modelo maximiza o lucro da venda de grãos em relação ao período com maior preço de venda ao mesmo momento que reduz o custo do transporte, do armazenamento e as perdas de grãos, contudo, para não proporcionar resultados previsíveis fez uso das restrições que refletem o planejamento intermodal de grãos.

6 RESULTADOS

A presente seção seguir mostra os resultados da aplicação do modelo matemático proposto. Logo, para a Seção 6.1 descreve o local do estudo, na qual proporcionou o processo de geração de instancias relacionado a casos práticos contextualizados ao cenário de pesquisa delineado. Na Seção 6.2 apresenta a análise dos resultados separados por instâncias, sendo apresentado o lucro da venda de grãos, o custo do transporte, custo da armazenagem e valor da perda de grãos. Por fim, na Seção 6.3 é estabelecido a rota do planejamento intermodal com as quantidades de grãos transportados e o período do transporte indicado.

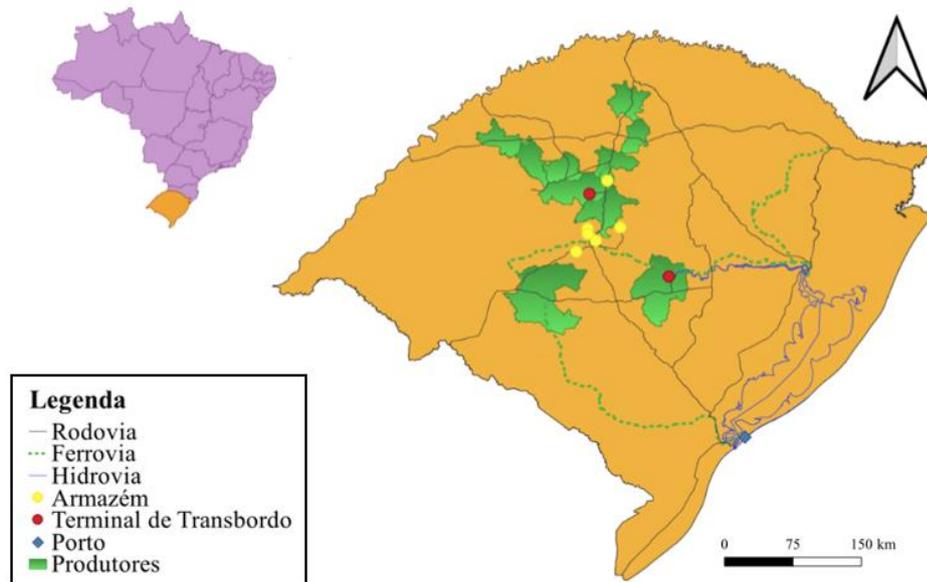
6.1 GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Para o estudo de caso foram selecionados 10 produtores localizado no centro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na qual somados obtiveram um total de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas de grãos na safra de 2021/22, sendo o principal destino da produção o porto de Rio Grande com capacidade de armazenamento de aproximadamente 120 mil toneladas. Além disso, o mapa da Figura 4 apresenta o caso de estudo com 6 armazéns de grãos, com capacidade estática entre 7 mil toneladas e 34 mil toneladas. Para proporcionar a intermodalidade, dois terminais de transbordo foram escolhidos, o primeiro com a capacidade de 50 mil toneladas e transbordo para o modal ferroviário, e o segundo com 80 mil toneladas com transbordo para o modal hidroviário.

Para determinar o preço de venda da soja foram utilizados os valores da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) durante os meses de março de 2021 até fevereiro de 2022, na qual variam entre R\$ 2.410,00 até R\$ 3.360,00 a tonelada (CONAB, 2023b). O preço de armazenagem e o custo do transporte foram obtidos a partir do questionário aplicado para gestores de cooperativas e produtores do estado nos meses de abril e maio de 2023. O questionário abordou questões relativas ao custo do transporte e ao tipo de transporte para entrevistados que possuem cerca de 100 hectares de plantação de grãos, e gerenciava frotas de veículos semanais para o transporte de grãos. Logo, segundo os resultados do questionário e da CONAB (2021), o preço de armazenagem, contabilizando as possíveis operações de transbordo, é de R\$ 5/t para cada 15 dias de grãos armazenados nos armazéns e R\$ 2/t para cada 15 dias nos terminais de transbordo, e o custo do transporte é de R\$ 250/t para o modal rodoviário, R\$150/t para o modal ferroviário e R\$100/t no modal hidroviário.

Além disso, informações acerca das perdas de grãos que ocorreram durante o transporte e o transbordo também foram obtidas pelo questionário e pelo órgão regulador, na qual apresentam variação de 1% à 2% do total transportado para todos os modais.

Figura 4 – Cenário do case de estudo



Fonte: Autor (2024)

Assim, para representar a logística de grãos dos produtores e dos gestores de cooperativa foram elaboradas instâncias com o intuito de comparar possíveis cenários do transporte e da armazenagem de grãos, sendo a comparação uma forma de orientar o gerenciamento logístico e a tomada de decisão. Para a comparação dos cenários, quatro instâncias representando os seguintes cenários aplicados no caso foram elaboradas: (i) planejamento intermodal que contemple o armazenamento e o transbordo de grãos (*AT*); (ii) planejamento intermodal que apresenta o armazenamento de grãos mas somente pelo modo rodoviário e sem o transbordo de grãos pelos terminais (*A*); (iii) planejamento intermodal que movimenta os grãos através dos modais e dos terminais de transbordo, mas sem utilizar os armazéns (*T*); (iv) movimentação de grãos somente pelo modal rodoviário e sem armazenamento (*R*).

6.2 USABILIDADE DO MODELO MATEMÁTICO

6.2.1 Análise 1: Lucro

A análise do lucro no planejamento intermodal é crucial para determinar a viabilidade do tipo de transporte adotado na logística de grãos, sendo recomendado o uso no transporte de cargas em grande volume e baixo valor agregado. O transporte intermodal apresenta modais com alta capacidade de carga a baixo custo, como os modais ferroviário e hidroviário, tornando-se assim muito mais competitivos no transporte de grãos em comparação ao uso do transporte rodoviário.

Assim, o uso do transporte intermodal foi perceptível na instância *AT*, na qual obteve o maior lucro, com aproximadamente R\$ 4,250 bilhões, cerca de R\$ 93 milhões a mais se comparado a instância *R* da Tabela 1, na qual apresenta a quantidade de grãos em toneladas e o lucro em bilhões de reais. O aumento do lucro ocorre por conta do baixo custo dos modais ferroviário e hidroviário, sendo que o modal rodoviário apresenta um maior custo em relação aos outros dois modais. Além disso, a quantidade de grãos comercializados das instâncias *A* e *T* não tiveram grandes diferenças, e o lucro das instâncias *AT*, *A* e *T*, foram semelhantes por conta do uso do transporte intermodal e da venda de grãos em períodos de mais valorização.

Tabela 1 - Lucro por instância

Período	AT (t)	A (t)	T (t)	R (t)
2	-	123.065	63.265	194.765
3	186.330	194.765	194.765	194.765
4	194.765	194.765	194.765	194.765
5	194.765	194.765	194.765	194.765
6	194.765	194.765	194.765	194.765
7	194.765	194.765	194.765	194.765
8	194.765	194.765	194.765	194.765
21	16.830	-	16.830	-
22	20.790	-	20.790	-
25	37.620	-	37.620	-
26	319.976	265.031	249.710	194.765
Total (t)	1.555.371	1.556.686	1.556.805	1.558.420
Lucro (em bilhões)	R\$ 4,250	R\$ 4,188	R\$ 4,220	R\$ 4,156

Fonte: Autor (2024)

Em relação a venda de grãos, foi notado que os grãos foram comercializados, em maior parte, entre os períodos 2 a 8, na qual configura a época de safra. A comercialização dos grãos na safra ocorre por conta da falta da capacidade estática dos armazéns, em contrapartida os períodos 21, 22, 25 e 26 possibilitaram a comercialização dos grãos armazenados na entressafra, pois na época da entressafra o preço se tornou mais atrativo para venda. Para Hei *et al.* (2014) a venda e o transporte de cargas por período proporciona uma valorização da carga, por isso um planejamento intermodal com multiperíodo é recomendado para cargas com variação de preço de venda. Além disso, a quantidade transportada é maior nas instâncias *A* e *T*, pois os grãos foram submetidos a menor quantidade de transferências entre o modal e a armazém/terminal de transbordo, o que acarretou uma menor quantidade de perdas de grãos.

A instância *AT* registrou a menor quantidade de grãos vendidos em comparação com as outras instâncias. A redução decorre das perdas de grãos durante a operação de transporte, pois o uso excessivo do transporte rodoviário para transporte de grãos entre os nós foi necessário, resultando em perdas proporcionalmente mais significativas. No entanto, a instância *AT* obteve um lucro de 2,2% maior se comparado a instância *R*, pois a utilização da intermodalidade para o transporte de grãos proporciona, um menor custo do transporte, e conseqüentemente, um maior faturamento. A instância *R* proporcionou o maior volume de venda de grãos, contudo com o menor faturamento, pois na instância foi indicado somente o uso do transporte rodoviário, na qual está associado a um maior custo do transporte. Destacase que o uso do transporte rodoviário para o transporte de carga também foi observado por Pan *et al.* (2013), na qual o maior uso de veículos pesados foi responsável por um menor lucro.

Além disso, a instância *T* obteve o segundo melhor lucro, mesmo a maior parte dos grãos não sendo armazenado em armazéns, pois a intermodalidade promoveu o transporte de grãos à um custo reduzido. Já a instância *A* obteve um lucro maior que a instância *R*, pois os grãos foram comercializados com o valor de venda relativamente mais atrativo, mesmo os grãos sendo transportados somente pelo modal rodoviário.

Semelhantemente, Bierwirth *et al.* (2012) também analisou a diferença entre a intermodalidade e a unimodalidade, na qual percebeu a influência do uso do transporte intermodal no aumento do lucro da entrega de carga por causa do baixo custo do modal ferroviário. Contudo, para curtas distâncias a intermodalidade apresentou uma diminuição do lucro em

relação ao modal rodoviário por conta dos custos associados ao transbordo de cargas, resultando um cuidado necessário ao adotar o transporte intermodal.

Além disso, Abbassi *et al.* (2018) endossou o uso da intermodalidade para aumentar o lucro, ao desenvolver um planejamento intermodal para o transporte de cargas por meio dos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. No entanto, destacou a significativa influência exercida pelos custos de transporte e pela capacidade dos terminais de transbordo no efetivo aproveitamento da intermodalidade. A pesquisa ressalta que, embora a intermodalidade represente uma estratégia vantajosa para otimizar a logística de transporte, é essencial abordar de maneira equilibrada e proativa os desafios relacionados aos custos e à infraestrutura dos terminais, garantindo assim uma implementação eficaz e economicamente viável do transporte intermodal.

6.2.2 Análise 2: Custo do transporte

O impacto do custo do transporte na adoção da intermodalidade é significativo, uma vez que o custo de transporte de grãos pode variar de acordo com os seguintes fatores: quantidade de terminais de transbordo os quais os grãos são transportados, a quantidade de veículos utilizados no transporte, o tempo de espera nos pátios dos armazéns e a influência do custo unitário de transporte na escolha do modal específico. Assim os fatores desempenham um papel crucial na determinação da viabilidade econômica da intermodalidade e no transporte de grãos.

A escolha do modal de transporte impacta o custo unitário do transporte, uma vez que a capacidade do veículo influencia diretamente a quantidade de grãos transportados. Logo, os modais ferroviário e hidroviário são indicados para o transporte de grãos devido à alta capacidade dos vagões e embarcações, o que diminui o custo do transporte. A relação entre alto custo e capacidade dos modais foi analisada em Norlund e Gribkovskaia (2021), na qual utilizaram o transporte hidroviário para movimentar contêineres por conta do alto custo do modal rodoviário. A troca do uso de modais por conta de alto custo e capacidade foi percebida também em Zhao *et al.* (2020), na qual o modal rodoviário foi trocado pelo modal ferroviário. No entanto, a pesquisa relatou a influência da redução do custo unitário do transporte por conta do aumento no uso do modal ferroviário, causando um aumento no tempo de espera nos pátios dos armazéns e, conseqüentemente, uma preferência pelo modal rodoviária para o

transporte de grãos. Na Tabela 2 a quantidade de grãos em cada instância está na unidade de medida toneladas e o custo do transporte está na unidade de milhões de reais.

Tabela 2 – Custo do transporte por instância

Nós	AT (t)	A (t)	T (t)	R (t)
P1	136.919	136.920	136.920	136.926
P2	130.390	140.240	130.637	140.244
P3	141.347	171.376	149.954	171.377
P4	529.953	580.469	507.913	580.474
P5	126.000	143.998	126.000	144.000
P6	100.799	100.800	88.200	100.800
P7	48.692	54.080	54.080	54.000
P8	59.768	59.768	59.768	59.768
P9	142.800	163.200	163.200	163.200
P10	39.063	39.064	39.064	39.067
A1	8.100	7.938	-	-
A2	21.168	21.168	-	-
A3	2.940	2.940	-	-
A4	10.584	10.584	-	-
A5	11.760	11.760	-	-
A6	15.876	15.876	-	-
T1	103.535	-	103.536	-
T2	160.831	-	160.831	-
Total (t)	1.790.525	1.660.181	1.720.103	1.589.856
Custo (em milhões)	R\$ 168,27	R\$ 158,75	R\$ 158,13	R\$ 156,96

Fonte: Autor (2024)

O custo do transporte nas instâncias *AT* é maior se comparado as outras instâncias em razão do uso do modal rodoviário para movimentar os grãos com destinos aos terminais de transbordo, pois os veículos pesados com baixa capacidade de carga transportam grãos para os terminais de transbordo com altas capacidades de cargas. Logo, o uso do modal rodoviário para abastecimento dos terminais de transbordo promove o aumento no custo do transporte, como visto em Norlund e Gribkovskaia (2021) e Zhao *et al.* (2020). Para as instâncias *A* e *T* observa-se uma semelhança notória no custo do transporte, pois ao comparar o custo de *A* e *T* com *AT* foi registrado uma redução de 5,7% e 6%, respectivamente.

Na análise dos dados logísticos, a quantidade movimentada entre as instâncias *AT* e *T* revelou-se a menor, exibindo uma diferença de cerca de 4%. Além disso, a quantidade de grãos movimentada releva que o produtor P4 precisa de mais veículos pesados para realizar o transporte, o que pode dificultar o planejamento intermodal dos outros nós por conta do gerenciamento do grande número de veículos pesados, pois para movimentar grades quantidade de grãos uma maior frota de veículos é necessária segundo Hu *et al.* (2018). O armazém A2 e o terminal de transbordo T2 foram os maiores armazenadores de grãos em todas as instâncias, o que promoveu maiores operações de armazenamento e de transbordo

nos terminais. Logo, o uso excessivo das operações dos terminais causa grandes filas de espera tanto nos terminais quanto no porto. Além disso, a uniformidade na movimentação dos grãos nas instâncias merece destaque, pois a redução do custo e a uniformidade foram obtidas através da limitação das capacidades estáticas dos armazéns, terminais de transbordo e portos, e pela produção quinzenal estabelecida.

Por conta disso, Huang e Zhao (2022) apresentam uma rede intermodal que transporta grandes quantidade de carga, na qual relatou o aumento do custo do transporte devido a fila de espera nos pátios dos terminais. Em concomitante, Behdani *et al.* (2016) relatou que o custo do transporte foi maior em situações como congestionamento de veículos pesados nos portos, sendo o alto uso das operações de transbordo o principal responsável pelo atraso.

6.2.3 Análise 3: Custo do armazenamento

Na Tabela 3, a elevada quantidade de grãos armazenados, em toneladas, impactou diretamente nos custos associados ao armazenamento na instância, em milhões de reais, demandando um considerável número de veículos para o transporte de grãos. Entretanto, a presença de um grande volume de veículos resulta em tempos prolongados de operações de carga e descarga nos armazéns e terminais, acarretando horas extras de trabalho que aumentam os custos de armazenamento.

Tabela 3 – Custo do armazenamento por instância

Nós	AT (t)	A (t)	T (t)	R (t)
A1	8.100	8.100	-	-
A2	21.600	21.600	-	-
A3	3.000	3.000	-	-
A4	10.800	10.800	-	-
A5	12.000	12.000	-	-
A6	16.200	16.200	-	-
T1	51.500	-	51.500	-
T2	80.000	-	80.000	-
Total (t)	203.200	71.700	131.500	-
Custo (em milhões)	R\$ 15,27	R\$ 8,96	R\$ 6,12	-

Fonte: Autor (2024)

Destaca-se que o custo de armazenamento na instância *AT* é notavelmente superior em comparação com outras instâncias, devido à necessidade de acomodar uma quantidade substancialmente maior de grãos. Já na instância *R* não ocorreu custos de armazenamento, pois os grãos foram transportados diretamente para o porto, eliminando assim a necessidade

de armazenagem intermediária. Para Wonfinger *et al.* (2019) o planejamento intermodal sem a análise da capacidade do terminal de carga intermediário é realizado, mas não apresentar uma limitação do fluxo de carga eleva o uso de veículos pesados.

A observação detalhada revelou também que o armazenamento dos grãos foi realizado ao longo de todo o período de safra, o que corresponde aos 8 primeiros períodos, enquanto a comercialização ocorreu durante os períodos 21 – 26 da entressafra, justificada pela atratividade dos valores de venda nesse período. Contudo, segundo Fazayeli *et al.* (2017), se vários veículos pesados transportarem a carga em um único período o número de clientes atendidos é reduzido por conta da alta concentração de operações de carga e descarga dos terminais de carga.

A capacidade máxima dos armazéns e terminais de transbordo foi quase completamente utilizada em todos os períodos, o que influenciou no fluxo de grãos transportados da Tabela 2. A influência da capacidade do armazém e dos terminais de transbordo no fluxo de carga foi analisado por Hosseini e Al Khaled (2021) e Fazayeli e Kamakabadi (2018), os quais limitaram o fluxo de carga em razão da capacidade dos terminais, o que contribuiu para um uso intensivo do modal rodoviário para a entrega das cargas aos destinos. Além disso, a quantidade de grãos estocada nos armazéns nas instâncias *AT* e *A* se equivalia, evidenciando uma utilização máxima dos espaços disponíveis.

Considerando que a capacidade estática dos armazéns e dos terminais de transbordo foram completamente utilizadas em todas as instâncias, é percebido que a capacidade estática ofertada não é suficiente para estocar toda a produção de grãos. Dessa forma, o transporte de grãos necessita de uma distribuição programada entre armazéns, terminais de transbordo e porto para o armazenamento, o que proporciona um planejamento intermodal mais complexo. Como visto em Riessen *et al.* (2015), na qual elaborou um planejamento intermodal que visou uma distribuição programada entre nós origem, destino e terminais de transbordo. Assim, a distribuição programa permitiu aos gestores dos terminais de trasbordo um gerenciamento mais eficiente do fluxo de carga.

6.2.4 Análise 4: Perda de grãos

As instâncias *AT*, *A* e *T* enfrentam as maiores perdas de grãos devido ao uso dos veículos pesados entre os nós. No entanto, segundo a Tabela 4 destaca-se que o faturamento perdido na instância *AT* é o mais expressivo, na qual é justificado pela maior quantidade de

grãos transportados e conseqüentemente perdidos durante os processos. A dinâmica de movimentação de grãos na instância *AT* se destaca por uma distribuição abrangente, incorporando diversos pontos intermediários, como armazéns e terminais de transbordo. Nesse cenário, busca se estrategicamente comercializar os grãos em momentos mais favoráveis em termos de valor de venda, visando maximizar a lucratividade. Contudo, é importante destacar, conforme evidenciado por Uddin e Huynh (2016) e Darayi et al. (2019), que a interrupção das operações em determinados pontos intermediários pode resultar em um aumento considerável do uso de veículos pesados em longas distâncias, além de causar significativos tempos de espera nos terminais operacionais. Na Tabela 4, a quantidade de grãos em cada instância está em toneladas e valor da perda de grãos está na unidade de milhões de reais.

Tabela 4 – Perda de grãos por instância

Nós	AT (t)	A (t)	T (t)	R (t)
P1	2.735	2.738	2.738	2.738
P2	2.603	2.804	2.608	2.802
P3	2.824	3.427	3.427	3.427
P4	10.597	11.60	10.158	11.609
P5	2.520	2.878	2.520	2.880
P6	2.015	2.016	1.764	2.016
P7	972	1.081	1.081	1.081
P8	1.192	1.193	1.195	1.195
P9	2.856	3.264	3.264	3.264
P10	775	781	781	781
A1	162	162	-	-
A2	432	432	-	-
A3	60	60	-	-
A4	216	216	-	-
A5	240	240	-	-
A6	324	324	-	-
T1	1.565	-	1.566	-
T2	2.431	-	2.432	-
Total (t)	34.519	33.222	33.538	31.798
Valor perdido (em milhões)	R\$ 99,10	R\$ 93,33	R\$ 93,98	R\$ 90,14

Fonte: Autor (2024)

A análise comparativa mostra que as perdas de grãos na instância *AT* são aproximadamente 8,5% superiores em comparação com a instância *R*. Em contrapartida, tanto para as instâncias *A* quanto *T*, a diferença situa-se em torno de 4,4%, sendo menor em cada uma delas em relação à instância *R*. O destaque para o faturamento perdido na instância *AT* é justificado pela utilização do modal rodoviário para o transporte de grãos entre os nós intermediários. Assim, durante um período com valores de venda mais atrativos, as perdas

monetárias na instância *AT* foram consideravelmente mais expressivas devido ao aumento do uso do modal rodoviário entre os nós, potencializando as perdas associadas. Uma maior perda de valor de venda em período foi analisada por Mogale *et al.* (2018), na qual afirmou que os grãos precisam ser perdidos em períodos de desvalorização e vendidos em períodos de maior valorização.

A perda de carga durante o transporte também foi analisada por Demir *et al.* (2019), na qual comparou um planejamento intermodal que atendia totalmente a demanda e um planejamento intermodal que atendia parcialmente a demanda, e relatou que decisão sobre rotas com perdas menores e faturamentos médios não apresentaram resultados eficientes. Liu *et al.* (2019) também afirmou que a perdas de carga durante o transporte prejudica a satisfação do cliente e o lucro da venda, orientando um planejamento intermodal com o mínimo de perdas possível.

6.3 ROTA DO PLANEJAMENTO INTERMODAL DE GRÃOS

A partir da análise dos resultados obtidos é possível estabelecer uma rota para o planejamento intermodal de grãos. Para a pesquisa foi selecionado a instância *AT* para estabelecer uma rota entre produtores, armazéns, terminais e transbordo e porto, pois proporcionou o maior lucro em relação as outras instancias. Logo, de acordo com as Tabelas 5 e 6 um fluxo de carga entre os nós foi observado, como, por exemplo, o nó *PI* transportar 12.831t para *A6* no período 2, 4.283t para *T2* no período 1 e cerca de 119.805t para *H1*, que foi distribuído igualmente entre os períodos 3 à 8 e 26. Para preservar a concisão do texto, é recomendado estender a aplicação da lógica aos demais nós.

Além da quantidade de grãos transportados, um padrão no fluxo de grãos e nos períodos foi verificado. Por exemplo, os produtores somente enviam grãos para os armazéns no período 2 e para os terminais de transbordo o transporte ocorre nos períodos 1 e 3. Os grãos ficaram estocados nos armazéns do período 2 a 25 e serão enviados ao porto no período 26. Já os terminais de transbordo devem transportar os grãos entre os períodos 21 a 23, 25, 26. Dessa forma, foi identificado que a movimentação de grãos para o porto foi orientada pela capacidade estática dos nós e pelo preço de venda dos grãos, sendo a alta do preço no momento da entressafra entre os períodos 20 e 26.

Tabela 5 – Matriz de origem/destino com fluxo de grãos

Nós	A1 (t)	A2 (t)	A3 (t)	A4 (t)	A5 (t)	A6 (t)	T1 (t)	T2 (t)	H1 (t)	Total (t)
P1						12.831		4.283	119.805	136.919
P2	8.265							9.264	122.710	140.239
P3								30.028	141.347	171.375
P4		21.696					50.862		507.913	580.471
P5		344						17.655	126.000	143.999
P6				355	12.244				88.200	100.799
P7			3.061			3.698			47.320	54.079
P8				7.471					52.297	59.768
P9								20.400	142.800	163.200
P10				3.194			1.688		34.181	39.063
A1									8.100	8.100
A2									21.600	21.600
A3									3.000	3.000
A4									10.800	10.800
A5									12.000	12.000
A6									16.200	16.200
T1									51.500	51.500
T2									80.000	80.000

Fonte: Autor (2024)

Tabela 6 – Matriz de origem/destino com períodos para fluxo de grãos

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	T1	T2	H1
P1						2		1	3 - 8, 26
P2	2							1	3 - 8, 26
P3								1 e 3	3 - 8, 26
P4		2					1		3 - 8, 26
P5		2						2	3 - 8, 26
P6				2	2				3 - 8, 26
P7			2			2			3 - 8, 26
P8				2					3 - 8, 26
P9								1	3 - 8, 26
P10				2				1	3 - 8, 26
A1									26
A2									26
A3									26
A4									26
A5									26
A6									26
T1									23 e 25
T2									21, 22, 25, 26

Fonte: Autor (2024)

A distribuição da quantidade de grãos por períodos limita o número de veículos utilizados para o transporte. Assim, Hosseini e Al Khaled (2021) indica que o limite do número de veículos aumenta o número de viagens e, conseqüentemente, a demanda por transportadores, o que proporciona um aumento do custo do transporte a curto prazo e uma redução do custo a longo prazo. Além disso, Kavlak *et al.* (2022) afirma que quantidade de carga transportada por período é influenciado pela disponibilidade dos modais, assim os produtores e gestores de cooperativas precisam a planejar o uso dos modais com antecedência.

Em relação ao armazenamento de grãos, a instância AT determinou que toda capacidade estática dos armazéns e dos terminais de transbordo fossem usadas, logo a Tabela 7 informa a quantidade de grãos em toneladas armazenadas e a quantidade de períodos. Assim, o maior custo do armazenamento foi notado no T2, pois foi estocado uma maior quantidade de grãos em quase todos os períodos.

Tabela 7 – Quantidade de grãos e custo do armazenamento

Nós	Total Armazenado (t)	Períodos	Custo Total (milhões R\$)
A1	8.100	25	1,01
A2	21.600	25	2,70
A3	3.000	25	0,37
A4	10.800	25	1,35
A5	12.000	25	1,50
A6	16.200	25	2,02
T1	51.500	24	2,47
T2	80.000	24	3,84
Total (t)	203.200		15,27

Fonte: Autor (2024)

A quantidade armazenada de grãos desempenha um papel crucial no aumento do lucro de venda, uma vez que os grãos podem ser mantidos em estoque até que o preço de venda se torne mais favorável. No entanto, a venda dos grãos está associada a relação entre o fator capacidade estática do armazém ou terminal de transbordo e ao fator número de veículos utilizados no transporte de grãos. A relação entre os fatores foi destacada por Hosseini e Al Khaled (2021), na qual observou o fluxo de veículos e carga variando de acordo com a capacidade do terminal. A interação entre a quantidade de grãos armazenados, a capacidade estática do terminal e o uso de veículos é crucial para as operações logísticas e maximizar a eficiência no transporte de grãos. Assim, Fazayeli *et al.* (2017) também afirma que o número de veículos alocados em um terminal determina o atendimento completo ou parcial do cliente,

logo o gerenciamento de veículos pesados em um terminal determina a satisfação ou insatisfação da demanda.

Para identificar a perdas de grãos na rota da instância *AT* foi calculado a perda de grãos da Tabela 8, na qual se baseou na quantidade de grãos transportados nos períodos da Tabela 5 e no preço de venda. Logo a perda de grãos da rota informa a quantidade de toneladas de grãos que não foram vendidas e o valor monetário que não foi ganho. Assim, foi relatado que P1 perdeu 256t de grãos ao realizar o transporte para A6, 85t ao transportar para T2 e 2.394t de grãos perdidos ao transportar para H1. Dessa forma, o total de grãos perdido do P1 foi de 2.735t e aproximadamente R\$ 7,76 milhões em vendas. Além disso, a perda de grãos foi maior do P4 para H1, pois a quantidade de grãos perdida durante o transporte para o porto foi 11.6607t, sendo que o produtor apresentou a maior quantidade de grãos produzidos em relação aos outros nós.

Tabela 8 – Matriz de origem/destino com a perda de grãos

Nós	A1(t)	A2(t)	A3(t)	A4(t)	A5(t)	A6(t)	T1(t)	T2(t)	H1(t)	Total Perdido (t)	Valor Perdido (milhões R\$)
P1						256		85	2.394	2.735	7,76
P2	165							185	2.450	2.800	7,91
P3									2.824	3.424	9,65
P4		433					1.017		10.157	11.607	32,77
P5		6						353	2.520	2.879	8,11
P6				7	244				1.764	2.015	5,71
P7			61			73			945	1.079	3,05
P8				149					1.043	1.192	3,75
P9								408	2.856	3.264	9,19
P10				63			33		679	775	2,21
A1									162	162	0,53
A2									432	342	1,42
A3									60	60	0,19
A4									216	216	0,71
A5									240	240	0,79
A6									324	324	1,07
T1									515	515	1,67
T2									800	800	2,52

Fonte: Autor (2024)

A quantidade de grãos perdida é diretamente proporcional a produção e ao total transportado pelo modal rodoviário, pois mais veículos pesados foram necessários para transportar os grãos. De modo geral, a instância *AT* apresentou a maior perda de grãos por

conta do uso o transporte rodoviário em transportar os grãos entre nós. Logo, o cenário foi analisado também em Dermi *et al.* (2019), na qual verificou o número de veículos pesados utilizados para transportar cargas entre nós que influenciaram no custo do transporte e no fluxo de carga, pois para atender a demanda uma maior quantidade de carga foi enviada para suprir a perda. Já para Mogale *et al.* (2018) a perda de grãos precisou ser minimamente perdida para atender a demanda, e o transporte de grãos por veículos pesados deve ser substituído pelo modal ferroviário, pois apresenta uma menor perda e menor custo do transporte.

7 CONCLUSÃO

A demanda de grãos no mundo elevou a necessidade de desenvolver tecnologias agrícolas para a produção de grãos, contudo o transporte e a armazenagem não são capazes de escoar e estocar toda a produção de grãos. Assim, por conta da ineficiência do transporte e da armazenagem um planejamento intermodal de grãos é necessário para auxiliar na tomada decisões, no entanto, elaborar estratégia no planejamento intermodal de grãos é complicado, pois é preciso levar em consideração os produtores, gestores de cooperativas, armazéns, terminais de transbordo, porto e fatores técnicos.

Por conta da dificuldade de elaborar um planejamento intermodal foi realizado uma revisão da literatura com o intuito de compreender a estrutura das redes intermodais e o desenvolvimento dos modelos matemáticos. Logo, a partir da revisão da literatura foi possível a tabulação das variáveis de decisão e das restrições dos modelos matemática, na qual auxiliou no desenvolvimento do modelo matemático da pesquisa. As variáveis de decisão mais utilizadas na revisão foram o fluxo de carga, ativação do modal de transporte, número de veículos e capacidade dos terminais. Já em relação as restrições as mais utilizadas foram conservação do fluxo de carga, atendimento da demanda, gerenciamento de veículos e tempo de entrega.

Outras variáveis de decisão podem ser adotadas no modelo matemático, como a ativação do modal de transporte, na qual condiciona o uso do modal em relação a capacidade do veículo ou do terminal de transbordo. Além da variável de decisão número de veículos, na qual informa o número de veículos utilizados no transporte de grãos. Em relação as restrições a janela de tempo de entrega e tempo de transporte poderia condicionar a intermodalidade em um cronograma de chegada e saída de veículos. No entanto, as variáveis de decisão de decisão e restrições mencionadas não foram incorporados no modelo pois requeria uma modelagem matemática mais elabora e um método de resolução mais sofisticado.

Logo após a revisão foi elaborado e aplicado um questionário aos produtores agrícolas e gestores de cooperativa, na qual forneceu informações sobre a configuração logística dos grãos que auxiliariam tanto no desenvolvimento do grafo quanto nos dados do caso de estudo. Assim, foi possível estruturar um grafo que representa um problema de transporte de transbordo e exibe valores e limitações que afetam a tomada de decisões, como custo do transporte, capacidade do nós, produção dos nós de origens, tempo de armazenamento e perda de grãos.

A representação do grafo permitiu desenvolvimento de um modelo matemático que proporcionou um fluxo de grãos com um maior faturamento considerando os custos do transporte e da armazenagem, além da perda de grãos. Dessa forma, os resultados indicaram a quantidade que dever ser armazenada e transportada por cada modal, considerando não só as capacidades dos terminais, mas também indicando o período mais recomendado para a venda dos grãos.

Os resultados mostraram que a intermodalidade promoveu um maior faturamento dos grãos, mesmo com maiores perdas durante as operações de transporte e transbordo. Por outro lado, o transporte rodoviário proporcionou um faturamento menor e acarretou com menos perdas. O faturamento em relação ao armazenamento apresentou resultados interessantes, pois permitiu a estocagem dos grãos para vender quando o preço de venda estivesse mais favorável. Além disso, o custo de armazenagem e as perdas de grãos foram maiores em instância que promoveram a intermodalidade, na qual é justificado pelo armazenamento de grãos nos terminais de transbordo e na perda de grãos durante transporte pelo modais ferroviário e hidroviário.

Por conseguinte, após identificar a instância que proporcionou o maior lucro foi estabelecido e detalhado uma rota de transporte, na qual pode transportar e armazenar os grãos de acordo com períodos estabelecidos. O estabelecimento da rota intermodal identificou os períodos mais propícios para transportar os grãos dos armazéns e terminais de transbordo em direção ao porto, assim a rota previu a quantidade de grãos transportados em cada período, além de informa o custo do transporte que irá descontar do montante da venda de grãos. Logo, o controle sobre a quantidade transportada, número de veículos e custo do transporte proporciona para o produtor e gestor da cooperativa um maior controle sobre o planejamento intermodal dos grãos.

Entretanto, a abrangência da pesquisa se restringiu ao estado do Rio Grande do Sul e ao corredor logístico sul, utilizando um número limitado de armazéns e terminais de transbordo para o escoamento de grãos. Uma coleta mais extensiva de respostas do questionário teria proporcionado uma compreensão mais abrangente da logística de grãos. Além disso, o planejamento tático intermodal não foi direcionado para a redistribuição de grãos entre armazéns e terminais de transbordo, o que teria promovido um fluxo mais eficiente no escoamento dos produtos.

Por fim, para futuras pesquisa é recomendado a análise do planejamento do transporte dos grãos levando em consideração a programação horária, redistribuição de grãos entre

armazéns e terminais de transbordo, além do uso de métodos estocásticos para modelos matemáticos que representam grafos intermodais. A programação horária é fortemente recomendada pois o modal ferroviário requer um quadro de horários para o funcionamento, sob a justificativa do modal só poder acessar o porto em determinados horários. Assim, os veículos pesados precisam ser cronologicamente coordenados para abastecer os armazéns que por sua vez transferem os grãos para o modal ferroviário, surgindo então um controle maior sobre o gerenciamento de veículos e um modelo matemático mais sofisticado.

Além da programação horária, a redistribuição de grãos entre armazéns também é um foco de estudo, pois os armazéns não apresentam capacidade estática necessário para o armazenamento de grãos. Logo, para aprimorar a eficiência do armazenamento de grãos é preciso um gerenciamento de fluxo de grãos através do modal rodoviário para o abastecimento dos terminais de transbordo, que precisa ser sempre abastecido de grãos para promover a intermodalidade. Contudo, para coordenar o fluxo de grãos entre armazéns um modelo matemático robusto precisa ser elaborado para determinar a quantidade de grãos a ser redistribuído sob o menor custo.

No contexto do planejamento intermodal proposto na pesquisa, a sustentabilidade pode ser avaliada ao considerar o uso do modal rodoviário no transporte dos grãos entre os pontos intermediários. A análise realizada demonstrou que o abastecimento dos armazéns e terminais de transbordo demandou a utilização de veículos pesados, resultando na emissão de poluentes durante o transporte de grãos. Portanto, é essencial realizar uma avaliação mais aprofundada das emissões de poluentes e explorar oportunidades para aprimorar a intermodalidade, visando práticas mais sustentáveis no transporte de grãos.

REFERÊNCIAS

- ABBASSI, Abderrahman; ALOUI, Ahmed El Hilai; BOUKACHOUR, Jaouad. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. **Journal of Computation Science**. [s. l.], v. 30, [s. n], p. 127, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.001> Acesso em: 15 nov. 2022.
- AGBO, Aaron Agbenyegah *et al.* Optimisation of Intermodal Freight Transport Network. **European Transport \ Trasporti Europei**. [s. l.], v. 63, [s. n], p. 1, 2017.
- AKGÜN, İbrahim; ÖZKIL, Altan; SELÇUK, Gören. A multimodal, multicommodity, and multiperiod planning problem for coal distribution to poor families. **Socioeconomic Planning Sciences**. [s. l.], v. 72, [s. n], jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100919> Acesso em: 15 nov. 2022.
- AMARAL, Daniel Furlan. **Desmistificando o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: a visão da indústria brasileira de óleos vegetais**. Abiove. São Paulo, 2009. Disponível em: http://www.abiove.com.br/palestras/abiove_relatorio_biodiesel_ago09_br.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.
- AMBROSINO, Daniela; SCIOMACHEN, Aanna. Impact of externalities on the design and management of multimodal logistic networks. **Sustainability**. [s. l.], v. 13, [s. n], abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13095080> Acesso em: 15 nov. 2022.
- ALEXANDRATOS, Nikos; BRUINSMA, Jelle. World agriculture towards 2030 / 2050: The 2012 Revision. ESA Work. [s. l.], n. 12-03, 2012. Acesso em: 15 nov. 2022.
- ALLOUI, Aymen *et al.* Systematic literature review on collaborative sustainable transportation: overview, analysis and perspectives. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**. [s. l.], v. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100291>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- ARNOLD, J. R. Tony. **Administração de materiais**. Editora Atlas, São Paulo. 1999. 528 p.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. São Paulo: Editora Bookman, 2006. 616 p.
- BAYKASOĞLU, Adil; SUBULAN, Kemal. A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application. **Transportation Research Part E Logistic Transportation Review**. [s. l.], v. 95, [s. n], out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.09.011> Acesso em: 15 nov. 2022.
- BEHDANI, Behzad *et al.* Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems. **European Journal Transport Infrastructures Research**. [s. l.], v. 16, n° 3, p. 424. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18757/ejtir.2016.16.3.3151> Acesso em: 15 nov. 2022.
- BIERWIRTH, Christian *et al.* On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks. **Business Research**. [s. l.], v. 5, [s. n.], p. 198, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03342738>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BOLETIM [DA] AGROPECUÁRIA BRASILEIRA EM NÚMEROS (ABN). Brasília: Ministério da Agricultura e Agropecuária. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-2023-03.pdf/view>. Acesso em 1 mar. 2023.

BOLETIM [DO] CENTRO DE ESTUDOS APLICADOS EM ECONOMIA AVANÇADA (CEPEA). São Paulo. Confederação Nacional da Agricultura e Abastecimento. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023.pdf>. Acesso em 20 mar. 2023.

CHOPRA, Sunil; MEINDL, Peter. **Gestão da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operações**. 4 ed. Editora Pearson, São Paulo, p. 144. 2011

CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária Do Brasil. Mapa da logística da soja e do milho no Brasil (2020). Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/mapa-da-logistica-da-soja-e-do-milho-no-brasil-2020>. Acesso em: 5 mar 2023.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte Aquaviário. Cabotagem 2013. CNT, Brasília. 2013.

COELHO, Estevam Henrique; MARJOTTA-MAISTRO, Marta Coata Caracterização da infraestrutura de armazenagem para grãos: quantificação das capacidades estática e dinâmica. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**. [s. l.], v. 5, n. 1, p. 48, mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03342738>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perdas em transporte e armazenagem de grãos: Panorama atual e perspectivas**. Brasília, 2021.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: Safra Grãos 2022/23**. Vol. 5, Brasília, 2023.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de informações**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/precos-agropecuarios-serie-historica.html>. Acesso em 30 set. 2023.

CRAINIC, Teodor Gabirel; LAPORTE, Gilbert. Planning models for freight transportation. **European Journal Operation**. [s. l.], v. 97, [s. n.], p. 409, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00298-6). Acesso em: 10 mar. 2023.

CRAINIC, Teodor Gabriel *et al.* Modeling dry-port-based freight distribution planning. **Transportation Research Part C Emerging Technologies**. [s. l.], v. 55, [s. n.], p. 518, abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.026> Acesso em: 15 nov. 2022.

DARAYI, Mohamad; BARKER, Kash; NICHOLSON, Charles D. A multi-industry economic impact perspective on adaptive capacity planning in a freight transportation network. **Internation Journal of Production Economics**. [s. l.], v. 208, [s. n.], p. 356, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.008> Acesso em: 15 nov. 2022.

DEMIR, Emrah *et al.* Green intermodal freight transportation: bi-objective modelling and analysis. **International Journal of Production Research**. [s. l.], v. 57, n° 19, p. 6162, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1620363> Acesso em: 15 nov. 2022.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Soja em Número: safra 2021/22**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 05 de mar. 2023.

ELBERT, Ralf; MÜLLERY, Jan Philipp; RENTSHCLER, Johannes. Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. **Research Transport Bussines. Management**. [s. l.], v. 35, [s. n.], mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462>. Acesso em: 10 mar. 2023.

FAZAYELI, Saeed; KAMAKABADI, Isa Nakhai. Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. **Computers & Industrial Engineering**. [s. l.], [s. n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041> Acesso em: 15 nov. 2022.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4 ed. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HARKS, Tobias *et al.* An integrated approach to tactical transportation planning in logistics networks. **Transportation Science**. [s. l.], v. 50, n. 2, p. 439 mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.2014.0541>. Acesso em: 10 mar. 2023.

HE, Ting *et al.* A fuzzy AHP based integer linear programming model for the multi-criteria transshipment problem. **International Journal of Logistics Management**. [S. l.], vol. 23, n° 1, p. 159, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/09574091211226975> Acesso em: 15 nov. 2022.

HEI, Xiuling *et al.* Optimal automobile distribution model in multimodal freight transportation networks. **Transportation Research Record**. Washington D.C., n ° 2450, p. 50, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2410-06> Acesso em: 16 nov. 2022.

HEINOLD, Arne; MEISEL, Frank. Emission limits and emission allocation schemes in intermodal freight transportation. **Transportation Research Part E Logistic Transportation Review**. [s. l.], v. 141, [s. n.], abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101963> Acesso em: 16 nov. 2022.

HOSSEINI, Seyedmohsen; AL KHALED, Abdullah. Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures. **Computers & Industrial Engineering**. [s. l.], vol. 159, [s. n.], jun. 2021 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107522> Acesso em: 16 nov. 2022.

HU, Qu *et al.* A tabu search algorithm to solve the integrated planning of container on an inter-terminal network connected with a hinterland rail network. **Transportation Research Part C Emerging Technologies**. [s. l.], v. 91, [s. n.], p. 15, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.019> Acesso em: 16 nov. 2022.

HUANG, Kuancheng; LEE, Yu-Ting; XU, Haoran. A routing and consolidation decision model for containerized air-land intermodal operations. **Computers & Industrial Engineering**. [s. l.], vol. 141, [s. n.], jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106299>. Acesso em: 16 nov. 2022.

JONES, Myfanwy L. Application of systematic review methods to qualitative research: practical issues. **Journal of Advanced Nursing**, Vol. 48, No. 3, 2004, p. 271-278.

JÚNIOR, Paulo C. M.; NETO, Stelito Assis do Reis. Perdas em Transporte e Armazenagem de Grãos: Panorama atual e perspectivas. **CONAB**. Brasília, Brasil, 2022.

KAEWFAK, Kwanjira; AMMARAPALA, Veerls; HUYNH, Van-Nam. Multi-objective optimization of freight route choices in multimodal transportation. **International Journal of Computational Intelligence Systems**. [s. l.], vol. 14, n° 1, p. 794, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/ijcis.d.210126.001>. Acesso em: 16 nov. 2022.

KE, Ginger Y; VERMA, Manish., 2021. A framework to managing disruption risk in rail-truck intermodal transportation networks. **Transportation Research Part E Logistic Transportation Review**. [s. l.], v. 153, [s. n.], abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102340>. Acesso em: 16 nov. 2022.

KLANOVICZ, J.; MORES, L. A **Sojização da Agricultura Moderna no Paraná, Brasil: Uma questão de história ambiental**. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 240–263, 2017.

LEE, Hyangsook *et al.* Game theoretical models of the cooperative carrier behavior. **KSCE Journal of Civil Engineering**. [s. l.], v. 18, n° 5, mai. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12205-014-1337-x>. Acesso em: 16 nov. 2022.

LIU, Dan *et al.* Design and freight corridor-fleet size choice in collaborative intermodal transportation network considering economies of scale. **Sustainability**. [s. l.], v. 11, [s. n.], p. 990, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11040990>. Acesso em: 16 nov. 2022.

LIU, Ruchen; STEFANOVISH, Anton; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Sensitivity of a High-Speed Rail Development on Supply Chain and Logistics via Air-Rail-Road Freight Transportation. **Frontiers in Built Environment**. [s. l.], v. 7, [s. n.], p. 1, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.685884>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MAIA, Guilherme Baptista da Silva *et al.* Panorama da armazenagem de produtos agrícolas no Brasil. **Revista do BNDES**. Brasília, v. 40, [s. n.], p. 161, 2013.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio Brasil 2019/20 a 2029/30** Projeções de Longo Prazo. Mapa, [s. l.], p. 102, 2020.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. *Metodologia Científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017

MOGALE, Dnyaneshwar *et al.* Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network. **Transportation Research Part E Logistic Transportation Review**. [s. l.], v. 111, [s. n.], p. 40, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.01>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MUNIM, Ziaul Haque; HARALAMBIDES, Hercules. Competition and cooperation for intermodal container transshipment: A network optimization approach. **Research Transportation Business Management**. [s. l.], v. 26, [s. n.], p. 87, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2018.03.004>. Acesso em: 10 mar. 2023.

NORLUND, Ellen Karoline; GRIBKOVSKAIA, Irina. Modal split in offshore supply network under the objective of emissions minimization. **Transportation Research Part D Transport Environment**. [s. l.], v. 35, [s. n.], p. 160, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.018>. Acesso em: 17 nov. 2022.

OSORIO-MORA, Alan *et al.* Multimodal Capacitated HubLocation Problems with Multi-Commodities: An Application in Freight Transport. **Journal Advanced Transportation**. jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/2431763>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ÖZPEYNIRCI, Özgür; ÜÇER, Koray; TABAKLAR, Tunca. Multimodal freight transportation with ship chartering. **Maritime Economics Logistics**. [s. l.], v. 16, n° 2, p. 188, nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/mel.2013.24>. Acesso em: 17 nov. 2022.

PAGE, Matthew J.; MCKENZIE, Joanne E.; BOSSUYT, Patrick M. *et al.* The PRISMA 2000 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ Publ. Group**. v. 372, 2021.

PALAGIN, Yuri; MOCHALOV, Alexander; TIMONIN, Alexey. Mathematical modelling and parameters calculations in multimodal freight terminal networks. **The Archives Transport**. [s. l.], v. 30, n° 2, p. 188, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5604/08669546.1146980>. Acesso em: 17 nov. 2022.

PAN, Shelen; BALLOT, Eric; FONTANE, Frédéric. The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. **Int. Journal Production Economics**. [s. l.], v. 143, [s. n.], p. 86, out. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.023>. Acesso em: 17 nov. 2022.

PEREIRA, B. M. **Planejamento do Trabalho de Conclusão de Curso - Aula 6 - Metodologia**, slides, 2019.

QU, Wenhua *et al.* Hinterland freight transportation replanning model under the framework of synchromodality. **Transportation Research Part E Logistic Transportation Review**. [s. l.], v. 131, [s. n.], p. 308, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.014>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RAY, Deepak K. *et al.* Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. **PLoS One** 8. Nova York, v. 8, n. 6, p. 308, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone>. Acesso em: 10 mar. 2023.

RIESSEN, Bart van *et al.* Service network design for an intermodal container network with flexible transit times and the possibility of using subcontracted transport. **Int. Journal Shipping Transport Logistics**. [s. l.], v. 7, n° 4, p. 457, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2015.069683>. Acesso em: 17 nov. 2022.

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. [S. l.]: Edições Aduaneiras, 2008.

RUDI, Andreas *et al.* Freight transportation planning considering carbon emissions and in-transit holding costs: a capacitated multi-commodity network flow model. **EURO Journal Transport and Logistics**. [s. l.], v. 5, [s. n.], p. 183, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0062-4>. Acesso em: 17 nov. 2022.

SONG, Dong-Ping; DONG, Jing-Xin. Cargo routing and empty container repositioning in multiple service routes. **Transportation Research Part B**. [s. l.], v. 46, [s. n.], p. 1556, ago. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.003>. Acesso em: 10 mar. 2023.

STEADIESEIFI, Maryam *et al.* Multimodal freight transportation planning: A literature review. **European Journal of Operation Research**. [s. l.], v. 233, [s. n.], p. 1, jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.055> Acesso em: 10 mar. 2023.

TAVARES, Carlos Eduardo Cruz. Análise da competitividade da cadeia produtiva da soja em Mato Grosso. **Revista de Política Agrícola**, [s. l.], p. 75–87, 2005.

TAWFIK, Christine; LIMBOURG, Sabine. Pricing problems in intermodal freight transport: Research overview and prospects. **Sustainability**. [s. l.], v. 10, [s. n.], set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10093341>. Acesso em: 17 nov. 2022

TAWFIK, Christine; LIMBOURG, Sabine. Scenario-based analysis for intermodal transport in the context of service network design models. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**. [s. l.], v. 2, [s. n.], out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100036>. Acesso em: 17 nov. 2022.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART; Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, Vol. 14, No. 3, 2003, p. 207-222.

UDDIN, Majbah M.; HUYNH, Nathan. Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. **Transportation Research Record**. Washington D. C., n° 2548, p. 71, jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2548-09>. Acesso em: 17 nov. 2022.

UDDIN, Majbah; HUYNH, Nathan. Reliable Routing of Road-Rail Intermodal Freight under Uncertainty. **Networks Spatial Economics**. [s. l.], v. 19, [s. n.], p. 929, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9438-6>. Acesso em: 17 nov. 2022.

USDA. UNITED STATION DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Graphical Query: **Top Countries** **By** **Commodity**. Disponível em:

<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity#chart125>. Acesso em: 30 jan. 2023

WANG, Chia-Nan *et al.* Transportation optimization models for intermodal networks with fuzzy node capacity, detour factor, and vehicle utilization constraints. **Mathematics**. [s. l.], v. 8, [s. n.], nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math8122109>. Acesso em: 17 nov. 2022.

WANG, Zhanzhing *et al.* Modeling and Planning Multimodal Transport Paths for Risk and Energy Efficiency Using AND/OR Graphs and Discrete Ant Colony Optimization. **IEEE Access**. [s. l.], v. 8, [s. n.], jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010376>. Acesso em: 17 nov. 2022.

WOLFINGER, David; TRICOIRE, Fabien; DOERNER, Karl F. A matheuristic for a multimodal long haul routing problem. **EURO Journal Transport and Logistic**. [s. l.], v. 8, [s. n.], p. 397, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13676-018-0131-1>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ZEMOLIN, Evandro Marcos. **Análise da evolução da competitividade e da inserção externa do complexo soja brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/70000>. Acesso em: 30 jan. 2023.

ZHANG, M.; PEL, A. J. Synchronodal hinterland freight transport: Model study for the port of Rotterdam. **Journal of Transport Geography**. [s. l.], v. 52, [s. n.], p. 1, abr. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.02.007>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ZHAO, Yuzhe *et al.* Economic and environmental impacts of China's imported iron ore transport chain under road-to-rail policy: an empirical analysis based on the Bohai Economic Rim. **Carbon Management**. [s. l.], v. 1, n° 6, p. 653, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1840874>. Acesso em: 17 nov. 2022.

APÊNDICE A: PÁGINAS DO QUESTIONÁRIO DA PESQUISA

Figura 5 – Página inicial do questionário



Planejamento do transporte e da armazenagem de grãos no Brasil

O presente questionário objetiva recolher a opinião dos atores relacionados ao transporte e a armazenagem de grãos para avaliar os fatores e os problemas que afetam o planejamento do transporte de grãos.

A pesquisa acadêmica está sendo conduzida pelo mestrando Jonathan Vieira, orientado pelo Prof. Alvaro Neuenfeldt Júnior do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção (PPGEP) e pela Profa. Vanessa Alves do curso de Engenharia de Transporte e Logística da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A pesquisa tem como objetivo obter informações sobre o planejamento do transporte e da armazenagem de grãos para construir um modelo matemático que possa facilitar o gerenciamento logístico dos grãos.

As repostas são estritamente anônimas e serão utilizadas para fins acadêmicos.

Caso houver interesse nos resultados do questionário ou dúvidas entrar em contato no email: jonathanbarros26@gmail.com

O tempo médio necessário para responder a este questionário é de 7 minutos.

Desde já agradecemos sua contribuição.

jonathanbarros26@gmail.com [Alternar conta](#) 

 Não compartilhado

* Indica uma pergunta obrigatória

Responda, considerando a sua atuação como: *

Produtor

Profissional atuante em unidades armazenadoras

[Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Figura 6 – Questões aos produtores

Produtor

Em qual(is) cidade(s) ocorre a colheita? *

Sua resposta _____

Qual quantidade de soja produzida (em toneladas) na última safra? (Caso não produza soja, por favor indique qual a cultura e a sua respectiva quantidade produzida) *

Sua resposta _____

Qual o tamanho da área semeada de grãos? *

De 0 a 25 hectares

De 25 a 50 hectares

De 50 a 75 hectares

De 75 a 100 hectares

+100 hectares

Qual o modal de transporte que você utiliza para o transporte de grãos? (Pode selecionar mais de uma opção). *

Rodoviário

Hidroviário

Ferroviário

Multimodal

Figura 7 – Questões aos gestores de cooperativas

Unidades armazenadoras

Qual o endereço da sua unidade de armazenamento? *

Sua resposta _____

Qual a capacidade estática da unidade de armazenamento? *

Sua resposta _____

Qual o custo médio de armazenamento dos grãos no último ano (2022/2023)? *
(Em t/mês)

R\$ 1 - R\$ 5

R\$ 5 - R\$ 10

R\$ 10 - R\$ 15

R\$ 15 - R\$ 20

+ R\$ 20

Ocorrem perdas de grãos durante o armazenamento? (Se sim, poderia informar o *
percentual de perdas em relação a produção de grãos enviada pelo produtor)

Sua resposta _____

APÊNDICE B: CARACTERIZAÇÃO DAS REDES INTERMODAIS

Quadro 3 – Localização e estrutura das redes intermodais

Article	Country/Continent	Network specifications
Bierwirth et al. (2012)	Europe	Difference of intermodal transport costs, unimodal transport cost
He et al. (2012)	China	Minimum quantity for transshipment, penalty for storing less than the minimum
Pan et al. (2013)	France	Three-level routing not considering the cost of transshipment
Hei et al. (2014)	China	Deliveries within a week
Lee et al. (2014)	South Korea	Commodities produced near the port terminal of shipment
Özpeynirci et al. (2014)	Turkey	Use of cabotage in combination with the road modal
Palagin et al. (2014)	Russia	Interaction between a distribution center of direct relationship with customers with another distribution center of freight collection
Crainic et al. (2015)	Italy	Arcs representing the temporal connection between two terminals
Norlund and Gribkovskaya (2015)	Norway	Partial transshipment of loads along the network
Riessen et al. (2015)	Netherlands	Coordinate the use of transportation modals for the period of one week
Zhang et al (2015)	Netherland	Three service networks to represent the intermodal network
Baykasoğlu and Subulan (2016)	Europe	No capacity for transport by Roll On-Roll off vessels and rail
Behdani et al. (2016)	Netherlands	Vehicle capacity in a week and departure and arrival time
Rudi et al. (2016)	United Kingdom	Network capacity restrictions and weight limits for cranes
Uddin and Huynh (2016)	USA	Interruptions in network services
Agbo et al. (2017)	Ghana	Minimize the cost and delivery time of full and empty containers
Fazayeli et al. (2018)	Iran	Each vehicle allocated to a depot and the capacity of the vehicle limits the number of customers to be served by the depot
Hu et al. (2018)	Netherlands	Structuring of the transport network from container unloading to delivery to the final destination
Heinold and Meisel (2018)	Europe	Definition of a limit for transshipment operations
Tawfik and Limbourg (2018)	Belgium	Network consisting of nodes that provide travel time
Abbassi et al. (2019)	Marocco	Difference between intermodal transport costs and unimodal transport costs
Darayi et al. (2019)	USA	Transport network considering node functionality or disabling the transport link
Demir et al. (2019)	Europe	Imbalance between supply and served demand
Liu et al. (2019)	China	The total supply in all farms must be greater than or equal to the total served demand in all ports abroad
Qu et al. (2019)	Netherlands	The network determines the loading and unloading time at each port
Tawfik and Limbourg (2019)	Belgium	Minimum amount of cargo delivery under one itinerary
Uddin and Huynh (2019)	USA	Transportation network involves at least two intermodal terminals
Wolfinger et al. (2019)	Europe	Time limit for the use of delivery vehicles not considering

		the waiting time or the terminals capacity
Akgün et al. (2020)	Turkey	Vehicles can go to the districts intended pass through other districts
Huang et al. (2020)	USA	Containers with different characteristics and rates
Wang et al. (2020a)	Viet Nam	Network tells the number of transfers allowed between the modals
Wang et al. (2020b)	China	The time required for service at any location depends on both the amount of Loading and Unloading and the type of vehicle
Zhao et al. (2020)	China	Intermodal network has no losses during deliveries
Kaewfak et al. (2021)	Thailand	Multimodal route analysis considering qualitative factors
Ke and Verma (2021)	USA	Redistribute cargo flow when a transshipment terminal is not operating
Ambrosino and Sciomachen (2021)	Italy	Transshipment between railways with trucks
Hosseini and Al Khaled (2021)	USA	Limit of trips per day and each vehicle can only carry out the transshipment once
Ahmady and Yeghaneh (2022)	Iran	Intermodal route interruption and limitation of load transfers between modals
Ertem et al. (2022)	Turkey	Possible fulfillment of demand under the influence of the time window and number of available vehicles
Hu (2022)	China	Use of intermodal transport under the reduction of monetary subsidy and pollutant emission
Huang and Zhao (2022)	China	Cargo shipment delivery guided by network limitation
Kavlak et al. (2022)	Turkey	Cargo delivery based on vehicle availability and terminal capacities
Ke (2022)	USA	Served demands subjected to cargo terminal service interruption
Lu and Wang (2022)	China	Use of intermodal transport under the influence of transport risks
Mohri and Thompson (2022)	Iran	Rail fare discounts that encourage intermodal transport
KP and Panicker (2022)	India	Vehicle selection in relation to vehicle capacity and delivery destination
Qi et al. (2022)	Europe	Each request has a single source-destination pair and defined service time

Fonte: Autor (2024)

APÊNDICE C: RESULTADO DO QUESTIONÁRIO DA PESQUISA

Quadro 4 – Respostas individuais do questionário

Entrevistado	Grãos	Transporte	Armazenagem	Perdas
Produtor 1	- Produção de 19.400t - Mais de 100 hectares de terra	- escoamento na Safra para porto - Terceirizado - Custo entre R\$ 240 e R\$ 300t/km - Somente Rodoviário	- Cooperativas - Custo entre R\$ 1 e R\$ 5t/15 dias	- 1% no transporte
Produtor 2	- Produção de 200.000t - Mais de 100 hectares de terra	- escoamento na entressafra para armazém - Terceirizado - Custo por volta de R\$ 230t/km - Somente Rodoviário	- Própria - Custo entre R\$ 5 e R\$ 10t/15 dias	- 2% no transporte
Produtor 3	- Produção de 700t - Mais de 100 hectares de terra	- escoamento na entressafra para porto - Terceirizado - Custo por volta de R\$ 250t/km - Somente Rodoviário	- Própria - Custo entre R\$ 5 e R\$ 10t/15 dias	- 0,3% no transporte
Gestor 1	-	- escoamento na entressafra - Terceirizado - Custo entre R\$ 95 e R\$ 115t/km - Intermodalidade	- Capacidade estática de 72.000t - Redistribuição de Grãos - Custo entre R\$ 5 e R\$ 10t/15 dias	- 0,25% no armazenamento - 0,3% no transbordo
Gestor 2	-	- escoamento na safra para indústria - Terceirizado - Custo por volta de R\$ 300t /km - Somente Rodoviário	- Capacidade estática de 72.000t - Redistribuição de Grãos - Custo entre R\$ 5 e R\$ 10t/15 dias	- Não ocorre perdas na armazenagem - 0,5% no transbordo

Fonte: Autor (2024)