v7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES OPERACIONAIS DE CO_2 POR MUDANÇA MODAL NO CORREDOR PORTO ALEGRE-RIO GRANDE

POTENTIAL REDUCTION OF OPERATIONAL CO_2 EMISSIONS THROUGH MODAL SHIFT IN THE PORTO ALEGRE–RIO GRANDE CORRIDOR

POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES OPERACIONALES DE CO_2 MEDIANTE EL CAMBIO MODAL EN EL CORREDOR PORTO ALEGRE–RIO GRANDE

Luiz Felipe Soares e Silva[1], Luana Dilélio Leal[2], José Carlos Cesar Amorim [3]

e799108

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.9108

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

Este estudo avalia o potencial de descarbonização do transporte de cargas por meio da mudança modal entre os sistemas rodoviário e hidroviário no corredor Porto Alegre–Rio Grande (RS). A pesquisa adota abordagem quantitativa e descritivo-comparativa, estruturada a partir de dados secundários oficiais, parâmetros operacionais representativos e fatores de emissão associados ao consumo de combustível. O cenário rodoviário foi construído com base em registros de circulação de veículos comerciais e estimativas de capacidade de carga, enquanto o cenário hidroviário foi dimensionado para transportar volume equivalente, utilizando uma barcaça autopropelida compatível com as características operacionais da hidrovia. A comparação entre os modos foi realizada a partir do consumo energético e das emissões diretas de CO_2 associadas à operação. Os resultados indicaram que o cenário hidroviário apresentou redução de aproximadamente 78% nas emissões de CO_2 em relação ao cenário rodoviário, sob as premissas adotadas. O resultado evidencia o potencial da transferência modal como estratégia de mitigação das emissões no transporte de cargas, embora sua aplicação dependa das condições operacionais, da utilização da capacidade dos veículos e embarcações e da disponibilidade de infraestrutura adequada. O estudo contribui para a avaliação ambiental do corredor analisado ao propor uma comparação modal baseada em demanda equivalente de transporte.

PALAVRAS-CHAVE: Descarbonização. Transporte de cargas. Transporte hidroviário. Mudança modal. Emissões de CO_2.

ABSTRACT

This study evaluates the decarbonization potential of freight transport through modal shift between road and inland waterway systems along the Porto Alegre–Rio Grande corridor, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The research adopts a quantitative and descriptive-comparative approach, based on official secondary data, representative operational parameters, and emission factors associated with fuel consumption. The road scenario was developed using commercial vehicle

[1] Graduado em Engenharia de Fortificação e Construção pelo Instituto Militar de Engenharia e mestrando no curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes no IME. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
[2] Graduada em Engenharia Civil pela Universidade da Região da Campanha (2022) e aluna de mestrado no curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes no Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
[3] Doutor em Engenharia Hidráulica pelo Institut National Polytechnique de Grenoble, França, e Professor Titular do Instituto Militar de Engenharia (IME), com atuação em Hidráulica, Recursos Hídricos e Transporte Aquaviário. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

traffic records and estimated payload capacities, whereas the inland waterway scenario was dimensioned to transport an equivalent freight volume using a self-propelled barge compatible with the operational characteristics of the waterway. The comparison between the two modes was conducted based on energy consumption and direct CO_2 emissions associated with transport operations. The results indicated that the inland waterway scenario achieved an approximately 78% reduction in CO_2 emissions compared with the road scenario under the assumptions adopted. The findings demonstrate the potential of modal shift as a strategy for mitigating freight transport emissions, although its implementation depends on operational conditions, vehicle and vessel capacity utilization, and the availability of adequate infrastructure. The study contributes to the environmental assessment of the analyzed corridor by providing a modal comparison based on equivalent transport demand.

KEYWORDS: *Decarbonization. Freight transport. Inland waterway transport. Modal shift. CO_2 emissions.*

RESUMEN

Este estudio evalúa el potencial de descarbonización del transporte de cargas mediante el cambio modal entre los sistemas carretero e hidroviario en el corredor Porto Alegre–Rio Grande, en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil. La investigación adopta un enfoque cuantitativo y descriptivo-comparativo, estructurado a partir de datos secundarios oficiales, parámetros operacionales representativos y factores de emisión asociados al consumo de combustible. El escenario carretero fue construido con base en registros de circulación de vehículos comerciales y estimaciones de capacidad útil de carga, mientras que el escenario hidroviario fue dimensionado para transportar un volumen equivalente de carga mediante una barcaza autopropulsada compatible con las características operacionales de la vía navegable. La comparación entre ambos modos se realizó considerando el consumo energético y las emisiones directas de CO_2 asociadas a la operación de transporte. Los resultados indicaron que el escenario hidroviario presentó una reducción de aproximadamente 78% en las emisiones de CO_2 en comparación con el escenario carretero, bajo las premisas adoptadas. Los resultados evidencian el potencial del cambio modal como estrategia de mitigación de emisiones en el transporte de cargas, aunque su aplicación depende de las condiciones operacionales, del nivel de utilización de la capacidad de vehículos y embarcaciones y de la disponibilidad de infraestructura adecuada. El estudio contribuye a la evaluación ambiental del corredor analizado mediante una comparación modal basada en una demanda equivalente de transporte.

PALABRAS CLAVE*: Descarbonización. Transporte de cargas. Transporte por vías navegables. Cambio modal. Emisiones de CO_2.*

INTRODUÇÃO

O transporte de cargas desempenha papel estratégico nas cadeias produtivas, mas permanece associado ao consumo de combustíveis fósseis e às emissões de gases de efeito estufa (GEE). Em 2019, o setor de transportes respondeu por aproximadamente 15% das emissões globais de GEE, sendo o transporte rodoviário responsável por cerca de 69% das emissões do próprio setor (IPCC, 2022). Nesse contexto, a descarbonização do transporte de cargas envolve estratégias relacionadas à eficiência energética, ao uso de combustíveis

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alternativos e à transferência de cargas para modos potencialmente menos intensivos em carbono (GHISOLFI *et al.*, 2024).

No Brasil, a matriz de transporte de cargas permanece fortemente concentrada no modo rodoviário, reforçando a relevância de estratégias capazes de ampliar a participação de alternativas modais (ANDRADE *et al.*, 2024). No Rio Grande do Sul, a escolha modal é influenciada por atributos como custo, confiabilidade e qualidade do serviço, indicando que a transferência de cargas entre modos depende não apenas de aspectos ambientais, mas também das características operacionais e logísticas do sistema de transporte (LARRANAGA; ARELLANA; SENNA, 2017).

Entre as alternativas disponíveis, o transporte hidroviário interior apresenta elevada capacidade de carga e potencial para reduzir a intensidade energética e as emissões por unidade transportada quando comparado ao transporte rodoviário, embora seu desempenho dependa das condições específicas de operação (BARROS; CARVALHO; BRASIL JUNIOR, 2022). Estudos de transferência modal demonstram que a substituição parcial do transporte rodoviário pelo hidroviário pode resultar em reduções relevantes de emissões, embora a magnitude dos resultados varie conforme as características de cada corredor logístico (JIANG *et al.*, 2024; CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2026).

No contexto do Rio Grande do Sul, estudos anteriores já discutiram as vantagens e as condições de utilização do transporte hidroviário, inclusive em operações relacionadas às regiões de Pelotas, Rio Grande e Charqueadas (SARAIVA; MAEHLER; DIAS, 2015). Entretanto, abordagens quantitativas de emissões podem exigir informações operacionais detalhadas sobre veículos, embarcações, consumo e utilização da capacidade, o que influencia a metodologia empregada na construção dos inventários de emissões (PENG *et al.*, 2024).

O corredor Porto Alegre–Rio Grande apresenta condições particularmente relevantes para essa comparação, pois Porto Alegre e Rio Grande encontram-se conectados por uma extensa infraestrutura hidroviária formada pelo Lago Guaíba e pela Lagoa dos Patos (RIO GRANDE DO SUL, 2024). Apesar das evidências disponíveis sobre o desempenho ambiental do transporte hidroviário e das avaliações quantitativas realizadas em outros contextos, ainda são limitadas as análises específicas que quantificam, sob uma mesma referência de demanda, as emissões dos modos rodoviário e hidroviário no corredor Porto Alegre–Rio Grande.

Diante desse contexto, este estudo busca responder à seguinte questão: qual é a diferença nas emissões de CO_2 entre os modos rodoviário e hidroviário para o transporte de volume equivalente de carga no corredor Porto Alegre–Rio Grande? Assim, o objetivo é comparar as emissões de CO_2 dos dois modos e estimar o potencial de redução decorrente da

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

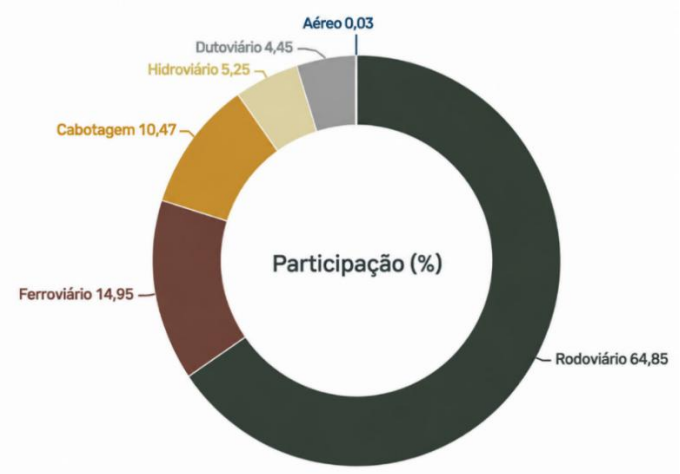
transferência modal. Para isso, serão utilizadas contagens observadas de veículos comerciais associadas a parâmetros de carga e consumo para estimar o cenário rodoviário, convertendo-se posteriormente o volume estimado em uma operação hidroviária equivalente. A hipótese do estudo é que, para o transporte de um mesmo volume de carga no corredor analisado, o modo hidroviário apresente menor emissão total de CO_2 do que o modo rodoviário.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Matriz de transporte de cargas e escolha modal

A matriz de transporte de cargas permite representar a participação dos diferentes modos na movimentação de mercadorias e constitui um instrumento para a análise dos fluxos logísticos e da utilização da infraestrutura de transportes (INFRA S.A., 2025). No Brasil, observa-se uma distribuição modal fortemente concentrada no transporte rodoviário, enquanto os modos ferroviário, hidroviário e dutoviário, a cabotagem e o transporte aéreo apresentam participações inferiores na movimentação nacional de cargas, conforme apresentado na Figura 1. Essa configuração evidencia a predominância estrutural do transporte rodoviário no país e a menor participação relativa das alternativas modais disponíveis (CNT, 2026). A literatura também identifica essa concentração como uma característica do transporte de cargas brasileiro e aponta a necessidade de ampliar a competitividade de modos alternativos (SOUZA *et al.*, 2022).

Figura 1. Matriz do transporte de cargas no Brasil



Fonte: CNT (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A escolha do modo de transporte, entretanto, não depende exclusivamente da disponibilidade de infraestrutura, constituindo um processo de decisão influenciado por diferentes atributos operacionais e econômicos (GOHARI *et al.*, 2022). A literatura sobre escolha modal de cargas identifica entre os principais critérios o custo de transporte, o tempo de entrega, a confiabilidade, a segurança, a flexibilidade, a frequência do serviço e aspectos relacionados às emissões de CO_2 (GOHARI *et al.*, 2022). Em revisão de estudos voltados à escolha entre alternativas intermodais, Gohari *et al.* (2022) observaram que o custo aparece como um dos critérios de maior importância, embora sua influência esteja associada a outros atributos do serviço.

No contexto brasileiro, Souza *et al.* (2022) também demonstram que as decisões dos embarcadores são condicionadas pelas características oferecidas pelos diferentes modos, indicando que mudanças na distribuição modal dependem da capacidade das alternativas de transporte de atender às exigências logísticas dos usuários.

No Rio Grande do Sul, a influência desses atributos sobre a escolha modal foi analisada por Larranaga, Arellana e Senna (2017), que identificaram o custo e o cumprimento dos prazos de entrega entre os fatores relevantes na decisão. Os autores também observaram que melhorias na confiabilidade das alternativas intermodais podem ser mais efetivas para estimular sua utilização do que reduções isoladas nos custos de transporte, evidenciando que a competitividade entre modos depende da combinação de diferentes atributos de serviço (LARRANAGA; ARELLANA; SENNA, 2017).

1.2. Descarbonização do transporte de cargas e transferência modal

A descarbonização do transporte de cargas pode ser promovida por diferentes estratégias, entre elas, melhorias de eficiência, uso de combustíveis de menor intensidade de carbono, renovação tecnológica e transferência de cargas para modos menos emissores (GHISOLFI *et al.*, 2022). No Brasil, Ghisolfi *et al.* (2024) mostram que reduções mais expressivas tendem a ocorrer quando essas medidas são combinadas, especialmente com maior participação de modos alternativos e redução da dependência de veículos a diesel.

A transferência modal constitui uma das alternativas para reduzir as emissões do transporte de cargas, embora seus efeitos dependam das condições de implementação e das características de cada sistema logístico (NASSAR *et al.*, 2023). Evidências empíricas indicam que a migração parcial de cargas do modo rodoviário para modos ferroviário e hidroviário pode reduzir emissões de CO_2, mas a magnitude desse benefício varia conforme o contexto operacional e energético analisado (LIU *et al.*, 2024).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.3. Transporte hidroviário interior e desempenho ambiental

O transporte hidroviário interior caracteriza-se pela elevada capacidade de movimentação de cargas e pelo potencial de menor consumo energético por unidade transportada, especialmente em operações de maior volume e distância (BARROS; CARVALHO; BRASIL JUNIOR, 2022). Essa característica pode favorecer menores emissões quando comparada a operações rodoviárias equivalentes, embora o desempenho ambiental dependa das condições específicas de utilização da embarcação e da infraestrutura disponível (BARROS; CARVALHO; BRASIL JUNIOR, 2022).

O benefício ambiental do transporte hidroviário não deve ser tratado como automático. As emissões associadas às embarcações variam conforme fatores como tipo de embarcação, potência instalada, consumo de combustível, distância percorrida e nível de utilização da capacidade de carga (PENG *et al.*, 2024). Dessa forma, a comparação ambiental entre os modos deve considerar parâmetros operacionais equivalentes e o volume efetivamente transportado, de modo a evitar conclusões baseadas apenas na capacidade nominal dos veículos ou embarcações (PENG *et al.*, 2024).

Em estudo realizado no Rio Grande do Sul, Saraiva, Maehler e Dias (2015) observaram que a capacidade de uma barcaça analisada correspondia à carga transportada por aproximadamente 140 caminhões. Essa vantagem de capacidade, entretanto, não é suficiente para determinar isoladamente o desempenho ambiental do modo hidroviário, que também depende das características operacionais, da distância percorrida, da utilização da capacidade e do consumo de combustível das embarcações (PENG *et al.*, 2024).

1.4. Indicadores e mensuração das emissões de CO_2 no transporte

A mensuração das emissões no transporte de cargas pode ser realizada a partir de diferentes abordagens, dependendo da disponibilidade de dados sobre atividade, consumo de combustível, distância percorrida e características dos veículos ou embarcações (MCKINNON; PIECYK, 2009). Entre os procedimentos utilizados, destaca-se a estimativa baseada no consumo energético associado a fatores de emissão, permitindo calcular as emissões atribuídas à operação de transporte e comparar cenários com diferentes características operacionais (OLIVARI; CABALLINI; LLUCH, 2025).

Além das emissões totais, indicadores de intensidade são utilizados para relacionar o impacto ambiental à quantidade de carga movimentada e à distância percorrida. A tonelada-quilômetro é amplamente empregada como indicador da atividade logística e pode ser associada a fatores de emissão para expressar o desempenho ambiental em unidades como g CO_2/(t.km)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(DENTE; TAVASSZY, 2017). Dessa forma, a utilização conjunta de emissões totais e indicadores de intensidade permite comparar diferentes modos de transporte considerando tanto o volume transportado quanto o percurso realizado (DENTE; TAVASSZY, 2017).

1.5. Evidências empíricas da transferência modal rodoviário–hidroviária

Estudos empíricos apontam potencial de redução das emissões decorrente da transferência de cargas do modo rodoviário para alternativas de maior capacidade, embora os resultados variem conforme o contexto analisado. No Brasil, Carvalho Junior *et al.* (2026), ao compararem cenários rodoviário e hidroviário no estado do Rio de Janeiro, estimaram redução de aproximadamente 80,5% das emissões de CO_2eq. Em estudo realizado na China, Jiang *et al.* (2024) estimaram redução potencial de 45.907 toneladas de CO_2 associada à transferência de cargas do transporte rodoviário para o hidroviário.

Em análise mais abrangente de mudança modal envolvendo ferrovias e hidrovias, Liu *et al.* (2024) também identificaram redução das emissões de CO_2 decorrente da substituição parcial do transporte rodoviário. Embora esses estudos utilizem métricas, escalas territoriais e condições operacionais distintas, seus resultados convergem ao indicar que a transferência modal pode contribuir para a redução das emissões do transporte de cargas, reforçando a necessidade de avaliações específicas para cada corredor logístico (JIANG *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2024; CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2026).

2. METODOLOGIA

2.1. Classificação da pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritivo-comparativa, desenvolvida por meio de estudo de caso no corredor Porto Alegre–Rio Grande. O estudo utiliza dados secundários provenientes de fontes públicas oficiais, combinados com parâmetros operacionais e fatores de emissão associados ao consumo de combustível, com o objetivo de estimar e comparar as emissões de CO_2 dos modos rodoviário e hidroviário. A classificação metodológica segue Gerhardt e Silveira (2009), segundo as quais a pesquisa quantitativa se baseia na mensuração de fenômenos por meio de dados numéricos e procedimentos sistemáticos de análise.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.2. Delineamento e procedimentos metodológicos

O estudo foi delineado a partir da comparação entre dois cenários de transporte de cargas no corredor Porto Alegre–Rio Grande: um cenário rodoviário de referência e um cenário hidroviário equivalente. No cenário rodoviário, o volume de carga transportada foi estimado a partir de dados de circulação de veículos comerciais, associados a parâmetros de capacidade de carga e de utilização dos veículos. A partir desse volume estimado, foi construído um cenário hidroviário capaz de transportar quantidade equivalente de carga, permitindo a comparação entre os dois modos sob uma mesma referência de demanda. A Figura 2 demonstra as etapas adotadas para a realização dos procedimentos metodológicos da pesquisa.

Figura 2. Fluxograma dos procedimentos metodológicos da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.3. Caracterização e delimitação do corredor Porto Alegre–Rio Grande

O corredor Porto Alegre–Rio Grande compreende uma ligação estratégica entre importantes centros logísticos do Rio Grande do Sul, com possibilidade de movimentação de cargas tanto pelo modo rodoviário quanto pelo hidroviário. No eixo rodoviário, a conexão entre a Região Metropolitana de Porto Alegre e Pelotas ocorre principalmente pela BR-116/RS, enquanto a ligação entre Pelotas e Rio Grande é complementada pela BR-392/RS, constituindo um importante corredor para o escoamento de cargas em direção ao Porto de Rio Grande. Para o cenário rodoviário, adotou-se a distância de 315 km entre Porto Alegre e Rio Grande, pelo corredor formado pelas BR-116/RS e BR-392/RS.

A conexão hidroviária é formada principalmente pelo Lago Guaíba e pela Lagoa dos Patos, apresentando extensão navegável de aproximadamente 310 km e integrando áreas relevantes para a circulação e o escoamento de cargas no estado (RIO GRANDE DO SUL,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2024). A Lagoa dos Patos é navegável por embarcações comerciais com calado de até 5,10 m, permitindo o acesso marítimo a Porto Alegre (BRASIL, 2013, p. 113).

A utilização econômica dessa infraestrutura permanece atual: em 2025, a movimentação de cargas pelas hidrovias do Rio Grande do Sul atingiu aproximadamente 1,9 milhão de toneladas, crescimento de 11,76% em relação ao ano anterior, em um contexto de expansão do transporte hidroviário associado, entre outras cargas, ao escoamento de celulose (BRASIL, 2026).

2.4. Fontes de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa são provenientes de fontes secundárias oficiais e de bases técnicas complementares, selecionadas de acordo com sua pertinência aos parâmetros empregados na construção dos cenários, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Fontes de dados utilizadas na pesquisa

Fonte	Dado utilizado	Aplicação metodológica
Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)	Registros de movimentação rodoviária em 2024	Definição da frota de referência por número de eixos
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)	Plano Nacional de Contagem de Tráfego	Definição das classes e categorias pelo sistema de eixos
Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	Consumo médio de combustível dos veículos de carga por categoria/número de eixos	Estimativa do consumo de diesel no cenário rodoviário
Base Cartográfica Oficial (DNIT)	Extensão do percurso rodoviário entre Porto Alegre e Rio Grande pelas BR-116 e BR-392	Definição da distância utilizada no cálculo do cenário rodoviário
Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ)	Registros de atracações, movimentação portuária e perfil das embarcações	Caracterização da operação hidroviária e apoio à definição da embarcação de referência
Plano Hidroviário Estratégico PHE (BRASIL, 2013)	Identificação de barcaças autopropelidas (SP) no trecho Rio Grande–Porto Alegre	Definição do tipo de embarcação de referência para o cenário hidroviário
Scania, Volvo e Facchini	Massa em ordem de marcha/tara de veículos-tratores e implementos	Definição das taras representativas utilizadas no cenário rodoviário
Concessão do Sistema Aquaviário Integrado dos Portos do Sul e Lagoa Mirim (2025)	Identificação da distância hidroviária, calado operacional e barcaças automotoras	Delimitação da rota hidroviária e verificação da compatibilidade dimensional da embarcação adotada
Overseas Mariners Centre 2000	Características técnicas de barcaça autopropelida de 4.838 DWT, motores principais, velocidade e consumo de combustível	Definição da embarcação técnica de referência e do consumo de combustível no cenário hidroviário

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (BRASIL, 2025)	Fator de emissão do diesel 2,63 kg CO_2/L	Conversão do consumo de diesel em emissões diretas de CO_2 nos cenários rodoviário e hidroviário
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2006)	Diretrizes para estimativa de emissões provenientes de combustão móvel	Fundamentação metodológica da estimativa das emissões de CO_2

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.5. Construção do cenário rodoviário

O cenário rodoviário de referência foi construído a partir dos registros de circulação de veículos comerciais no corredor Porto Alegre–Rio Grande, considerando as classes de veículos de carga classificadas conforme o número de eixos. Foram incluídos veículos das classes C, D, E, F, G e H, correspondentes, respectivamente, às configurações de 4, 5, 6, 7, 8 e 9 eixos, de acordo com a classificação veicular adotada pelo Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT/DNIT). Os registros referentes a 2024 foram organizados segundo o sentido de circulação – C no sentido de Porto Alegre a Pelotas; e D no sentido de Pelotas a Porto Alegre – e a classe veicular, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Fluxo de veículos por classe, número de eixos e sentido em 2024

Classe	Nº de Eixos	Sentido C	Sentido D
C	4	3.000	3.191
D	5	1.858	1.218
E	6	4.485	3.162
F	7	1.375	1.851
G	8	12	17
H	9	426	411

Fonte: Adaptado de PNCT/DNIT (2024).

A quantidade de veículos observada em 2024 foi obtida a partir dos dados de contagem disponibilizados pelo PNCT, sendo os registros organizados segundo o sentido de circulação e a respectiva classe veicular. Foram desconsiderados os registros de veículos de 2 e 3 eixos devido à possibilidade de inclusão, nessas categorias, de veículos destinados ao transporte coletivo de passageiros, o que poderia introduzir incerteza na estimativa do fluxo efetivamente associado ao transporte de cargas. Adicionalmente, optou-se por concentrar a análise nas configurações de 4 a 9 eixos, representativas de veículos de maior capacidade de transporte no corredor analisado.

Para a estimativa do volume de carga transportado no cenário rodoviário, foram adotadas configurações veiculares representativas para cada classe de número de eixos. Os limites do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Combinado (PBTC) foram definidos com base nas configurações apresentadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e nos limites regulamentares estabelecidos pela Resolução CONTRAN nº 882/2021, que disciplina os pesos e dimensões dos veículos e combinações de veículos em circulação no território nacional (BRASIL, 2021; DNIT, 2026).

Como o peso bruto inclui tanto a carga transportada quanto a massa própria do veículo e do implemento, a capacidade efetiva de transporte foi obtida pela diferença entre o PBT/PBTC da configuração adotada e sua respectiva tara. As taras foram definidas a partir de fichas técnicas de veículos-tratores e implementos rodoviários, constituindo parâmetros representativos das configurações consideradas, uma vez que a massa própria varia conforme modelo, carroceria, dimensões e equipamentos instalados, conforme valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de capacidade de carga adotados para o cenário rodoviário

Classe	Nº de eixos	PBT/PBTC adotado (t)	Tara adotada (t)	Carga útil adotada (t)
C	4	33,00	13,00	20,00
D	5	41,50	15,00	26,50
E	6	48,50	16,00	32,50
F	7	60,00	19,30	40,70
G	8	67,00	20,00	47,00
H	9	74,00	25,00	49,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os valores apresentados correspondem a configurações veiculares representativas adotadas para fins de modelagem e não constituem limites universais associados exclusivamente ao número de eixos, uma vez que o PBT/PBTC também depende da configuração do veículo, espaçamento entre eixos, número de unidades e demais requisitos regulamentares.

A partir do fluxo total de veículos e da carga útil adotada para cada configuração, estimou-se o volume de carga associado ao cenário rodoviário. Para cada classe, a quantidade total de veículos, obtida pela soma dos dois sentidos de circulação, foi multiplicada pela respectiva capacidade útil de transporte. O volume total foi obtido pela soma das cargas estimadas para todas as classes consideradas, conforme a Equação 1.

$$C_{rod} = N_i \times CU_i \qquad \text{Equação (1)}$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Onde:

C_{rod} = Volume total de carga estimado;

N_i = Número de veículos da classe;

CU_i = Carga útil adotada.

O cálculo pressupõe que os veículos considerados operem utilizando integralmente a capacidade útil adotada para cada configuração. Dessa forma, o valor obtido representa um cenário de referência baseado na capacidade potencial de transporte da frota observada, e não uma medição direta da massa efetivamente transportada, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3. Estimativa do volume de carga transportado no cenário rodoviário em 2024

Classe	Nº de Eixos	Total de viagens (Ano 2024)	Carga útil adotada (t)	Carga estimada (t)
C	4	6.191	20,00	123.820,00
D	5	3.076	26,50	81.514,00
E	6	7.647	32,50	248.527,50
F	7	3.226	40,70	131.298,20
G	8	29	47,00	1.363,00
H	9	837	49,00	41.013,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Portanto, a carga total estimada transportada no modo rodoviário no corredor Porto Alegre–Rio Grande para o ano de 2024 foi de 627.535,70 t.

2.6. Construção do cenário hidroviário equivalente

O cenário hidroviário equivalente foi estruturado com base nas características operacionais do sistema que conecta Porto Alegre a Rio Grande pela Lagoa dos Patos e pelo Lago Guaíba. Para a definição da embarcação de referência, considerou-se a configuração indicada no Plano Hidroviário Estratégico para os principais trechos da Hidrovia do Sul, apresentada na Figura 3. O documento identifica a utilização de barcaças autopropelidas (SP) nos trechos Rio Grande–Porto Alegre, Porto Alegre–Triunfo, Triunfo–Cachoeira do Sul e Triunfo–Estrela, justificando a adoção desse tipo de embarcação no cenário hidroviário deste estudo (BRASIL, 2013).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Trechos da Hidrovia do Sul e respectivos comboios-tipo

Sistema hidroviário	Trechos de rios	Dimensão dos comboios tipo
Hidrovia do Sul	Rio Grande - Porto Alegre	SP
	Porto Alegre - Triunfo	SP
	Triunfo - Cachoeira do Sul	SP
	Triunfo - Estrela	SP

Notas:
SP: barcaças auto-propelidas

Fonte: Adaptado de Plano Hidroviário Estratégico (BRASIL, 2013).

A escolha também é compatível com dados operacionais mais recentes do sistema hidroviário gaúcho. O estudo de engenharia da concessão do Sistema Aquaviário Integrado dos Portos do Sul e Lagoa Mirim registra que as operações de navegação interior entre Porto Alegre, Pelotas e Rio Grande são realizadas predominantemente por barcaças automotoras e que, em Rio Grande, essas embarcações apresentam DWT (*Deadweight Tonnage* ou, em português, Tonelagem de Porte Bruto) máximo de aproximadamente 5.700 toneladas, com calado inferior ao limite operacional de 5,18 m da hidrovia (CONCESSÃO DO SISTEMA AQUAVIÁRIO INTEGRADO DOS PORTOS DO SUL E LAGOA MIRIM, 2025).

Como os documentos referentes ao sistema hidroviário gaúcho não apresentam informações detalhadas sobre potência instalada e consumo de combustível dessas embarcações, adotou-se uma barcaça autopropelida de características técnicas semelhantes como referência para o dimensionamento energético. A embarcação selecionada apresenta 4.838 t de porte bruto (DWT), comprimento de 91,05 m, boca de 21,80 m e calado de 4,25 m, características compatíveis com as limitações operacionais identificadas para o corredor. Seu sistema propulsivo é composto por dois motores principais Weichai XC8200ZC-1, com potência nominal de 1.401 PS cada, sendo informado o consumo de aproximadamente 4.800 L/dia de combustível para os motores principais, acrescido de 480 L/dia associado à geração auxiliar, em condição operacional de aproximadamente 8 nós conforme a ficha técnica apresentada no Quadro 2 (OVERSEAS MARINERS CENTRE 2000, [s.d.]).

A escolha dessa embarcação não pressupõe sua utilização efetiva na hidrovia gaúcha, sendo empregada exclusivamente como referência técnica comparável para estimar o consumo energético de uma barcaça autopropelida de porte próximo ao observado no sistema Porto

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Alegre–Rio Grande. Essa abordagem permite utilizar um parâmetro de consumo diretamente associado a uma configuração real de embarcação, evitando a aplicação de valores provenientes de comboios com empurradores ou de embarcações de categorias distintas daquela adotada no cenário deste estudo.

Quadro 2. Características da barcaça autopropelida adotada como referência

Parâmetro	Valor adotado
Tipo de embarcação	Barcaça autopropelida
Porte bruto	4.838 DWT
Comprimento total	91,05 m
Boca	21,80 m
Calado	4,25 m
Motores principais	2 × Weichai XC8200ZC-1
Potência	1.401 PS por motor
Velocidade de referência	8 nós
Consumo dos motores principais	4.800 L/dia
Consumo dos sistemas auxiliares	480 L/dia
Consumo total considerado	5.280 L/dia

Fonte: Adaptado de Overseas Mariners Centre 2000 ([s.d.]).

Conforme Van Dorsser *et al.* (2020), o *deadweight* de embarcações de navegação interior é composto pela carga útil (*payload*) e pelos consumíveis necessários à operação, como combustível e água, sendo estes responsáveis por aproximadamente 4% a 8% do DWT de projeto nas embarcações de referência analisadas pelos autores. Dessa forma, o DWT não deve ser interpretado integralmente como capacidade comercial de carga. Neste estudo, adotou-se o valor intermediário de 6%, resultando em um fator de utilização de 94% do DWT para estimar a capacidade efetiva de carga da barcaça de referência, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Capacidade efetiva de carga adotada para a barcaça de referência

DWT da embarcação (t)	Fator de utilização do DWT	Capacidade efetiva adotada (t)
4.838	0,94	4.547,72

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.7. Estimativa do consumo de combustível e das emissões de CO_2

A estimativa do consumo de combustível no cenário rodoviário foi realizada a partir do fluxo de veículos por classe, da distância adotada para o corredor e do rendimento médio de combustível associado a cada configuração veicular. Para cada classe e sentido de circulação, o consumo foi calculado conforme a Equação (2).

$$C_{Rod} = \frac{N \times D}{R} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

C_{Rod} = Consumo de combustível da classe

N= Número de veículos registrados;

D = Distância rodoviária considerada, em quilômetros;

R = Rendimento médio do veículo;

Para a conversão do consumo de combustível em emissões de dióxido de carbono, adotou-se o fator de emissão de 2,63 kg CO_2/L para o diesel, conforme o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (BRASIL, 2025). As emissões foram calculadas conforme a Equação (3):

$$E_{CO2} = \frac{C_{Rod} \times FE}{1000} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

E_{CO2} = Emissões de CO_2, em toneladas

C_{Rod} = Consumo de combustível da classe

FE = Fator de emissão, em kg CO_2/L

A partir dos fluxos de veículos considerados no cenário rodoviário, dos rendimentos médios de combustível adotados para cada classe e da distância de 315 km utilizada no corredor, estimou-se o consumo total de diesel e as respectivas emissões de CO_2. Conforme apresentado na Tabela 5, foram consideradas 21.006 viagens de veículos comerciais, resultando em um consumo total estimado de 2.929.136,99 litros de diesel. Aplicando-se o fator de emissão de 2,63 kg CO_2/L, obteve-se uma emissão total de aproximadamente 7.703,64 toneladas de CO_2 para o cenário rodoviário analisado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 5. Consumo de combustível e emissões de CO_2 no cenário rodoviário

Classe	Nº de Eixos	Rendimento Médio (km/L)	Fluxo de veículos (2024)	Distância (km)	Total consumido (L)	Fator de emissão ($kgCO_2/L$)	Emissão de CO_2 (ton)
C	4	2,65	6.191	315	735.911,32	2,63	1.935,45
D	5	3,00	3.076	315	322.980,00	2,63	849,44
E	6	2,00	7.647	315	1.204.402,50	2,63	3.167,58
F	7	2,00	3.226	315	508.095,00	2,63	1.336,29
G	8	1,86	29	315	4.904,70	2,63	12,90
H	9	1,73	837	315	152.843,48	2,63	401,98

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para o cálculo das emissões no cenário hidroviário, o volume total de carga estimado no cenário rodoviário foi convertido no número de viagens hidroviárias necessárias para transportar a mesma quantidade de carga. Essa conversão foi realizada pela razão entre o volume total de carga e a capacidade efetiva adotada para a barcaça de referência, conforme a Equação 4. A relação entre o volume total de carga e a capacidade efetiva da barcaça resultou em 138 viagens hidroviárias, conforme apresentado na Tabela 6.

$$N_{Hidro} = \frac{C_{Rod}}{C_{ef}} \qquad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$\boldsymbol{N_{Hidro}}$ = Número de viagens hidroviárias;

C_{Rod} = O volume total de carga no cenário rodoviário;

C_{ef} = Capacidade efetiva de carga da barcaça.

Tabela 6. Determinação do número de viagens hidroviárias

Volume total de carga (t)	Capacidade efetiva da barcaça (t/viagem)	Número de viagens
627.535,70	4.547,72	138

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Como a velocidade de referência da embarcação foi informada em nós, realizou-se sua conversão para quilômetros por hora, resultando em 14,816 km/h, de modo a compatibilizar essa variável com a distância hidroviária expressa em quilômetros. Considerando a distância de 310 km entre Porto Alegre e Rio Grande, o tempo estimado de navegação por viagem foi obtido pela razão entre a distância percorrida e a velocidade operacional da embarcação, resultando em aproximadamente 20,92 horas.

O consumo de combustível da barcaça de referência é informado em litros por dia. Para compatibilizar esse dado com o tempo de navegação expresso em horas, o consumo diário de 5.280 L/dia foi convertido em consumo horário, resultando em 220 L/h. Multiplicando-se esse valor pelo tempo estimado de navegação, obteve-se um consumo de aproximadamente 4.603,13 litros por viagem. Considerando as 138 viagens hidroviárias necessárias para transportar volume de carga equivalente ao cenário rodoviário, o consumo total estimado foi de 635.232,18 litros.

Por fim, as emissões de CO_2 do cenário hidroviário foram estimadas a partir do consumo total de combustível e do fator de emissão adotado para o diesel. Para possibilitar a comparação direta com o cenário rodoviário, utilizou-se o mesmo fator de emissão de 2,63 kg CO_2/L, resultando em emissão total estimada de aproximadamente 1.670,66 toneladas de CO_2.

Tabela 7. Síntese dos parâmetros e resultados do cenário hidroviário

Indicador	Valor
Volume de carga equivalente	627.535,70 t
Capacidade efetiva da barcaça	4.547,72 t
Número de viagens	138
Consumo de diesel por viagem	4.603,13 L
Consumo total de diesel	635.232,18 L
Emissão total de CO_2	1.670,66 t CO_2

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.8. Indicadores de comparação entre os modos

A comparação entre os cenários rodoviário e hidroviário foi realizada a partir de indicadores de consumo de combustível e emissões de CO_2, considerando o transporte de volume equivalente de carga. Como indicador principal, utilizou-se a emissão total de CO_2 associada a cada modo, uma vez que os dois cenários foram dimensionados para transportar a mesma quantidade estimada de carga.

Além das emissões totais, foi calculada a redução percentual das emissões obtida pela substituição do cenário rodoviário pelo hidroviário, conforme a Equação 5:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$\triangle E_{CO2} = E_{rod} - E_{Hidro}$$ Equação (5)

A redução percentual foi calculada pela razão entre a diferença das emissões e o valor correspondente ao cenário rodoviário, conforme a Equação 6:

$$R_{CO2} = \frac{E_{rod} - E_{Hidro}}{E_{rod}} \times 100\%$$ Equação (6)

Dessa forma, os indicadores adotados permitem comparar o desempenho ambiental dos dois modos sob uma mesma referência de volume transportado, possibilitando tanto a quantificação das emissões associadas a cada cenário quanto a mensuração do benefício potencial decorrente da transferência modal. Esses indicadores constituem, portanto, a base para a análise comparativa dos cenários rodoviário e hidroviário apresentada na seção de resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam diferença expressiva entre os cenários rodoviário e hidroviário para o transporte de volume equivalente de carga no corredor Porto Alegre–Rio Grande. O cenário rodoviário foi construído a partir de 21.006 registros de veículos comerciais das classes de 4 a 9 eixos, correspondendo a uma capacidade potencial estimada de 627.535,70 t de carga. Para esse volume, o consumo total estimado foi de 2.929.136,99 L de diesel, resultando em aproximadamente 7.703,64 t de CO_2 emitidos.

No cenário hidroviário, o mesmo volume de carga foi convertido em 138 viagens de uma barcaça autopropelida com capacidade efetiva estimada de 4.547,72 t, resultando em consumo total de 635.232,18 L de combustível e emissão de aproximadamente 1.670,66 t de CO_2. A síntese dos principais indicadores considerados na comparação entre os modos é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Síntese dos resultados dos cenários rodoviário e hidroviário

Indicador	Cenário rodoviário	Cenário hidroviário
Volume de carga considerado (t)	627.535,70	627.535,70
Número de operações consideradas	21.006 veículos	138 viagens

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Distância adotada (km)	315	310
Consumo total de combustível (L)	2.929.136,99	635.232,18
Emissão total de CO_2 (t)	7.703,64	1.670,66

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação entre os cenários indicou redução absoluta de 6.032,98 t de CO_2 e redução percentual de 78,31% nas emissões do cenário hidroviário em relação ao rodoviário. A partir desses resultados, a discussão foi organizada em três dimensões: desempenho energético e redução das emissões, intensidade das emissões e implicações e limites dos resultados.

3.1. Desempenho energético e redução das emissões

A redução observada nas emissões está diretamente relacionada à diferença de consumo de combustível entre os cenários. Como foi adotado o mesmo fator de emissão do diesel para ambos os modos, a variação nas emissões decorre essencialmente da quantidade de combustível necessária para transportar o volume de carga considerado. Nesse sentido, o consumo estimado no cenário hidroviário correspondeu a aproximadamente 21,7% daquele calculado para o cenário rodoviário.

Essa diferença está associada, entre outros fatores, à elevada capacidade unitária de transporte da embarcação adotada. A barcaça de referência apresenta capacidade efetiva estimada de 4.547,72 t por viagem, permitindo representar as 627.535,70 t do cenário de referência em 138 operações hidroviárias. Esse comportamento é compatível com a literatura, que relaciona a elevada capacidade de carga do transporte hidroviário à possibilidade de menor consumo energético por unidade transportada em determinadas condições operacionais (BARROS; CARVALHO; BRASIL JUNIOR, 2022).

3.2. Intensidade das emissões

A diferença entre os modos também permanece evidente quando as emissões são relacionadas à quantidade de carga transportada. No cenário rodoviário, foram estimados aproximadamente 12,28 kg CO_2 por tonelada transportada, enquanto o cenário hidroviário apresentou cerca de 2,66 kg CO_2/t. Esses resultados indicam que, para cada tonelada considerada no modelo, a emissão estimada no cenário hidroviário foi substancialmente inferior àquela obtida no cenário rodoviário.

Quando a distância percorrida também é incorporada à análise, obtêm-se intensidades de emissão de aproximadamente 38,97 g CO_2/(t·km) para o cenário rodoviário e 8,59 g CO_2/(t·km) para o hidroviário. O indicador em tonelada-quilômetro permite relacionar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

simultaneamente emissões, carga e distância percorrida, sendo adequado à comparação do desempenho ambiental entre diferentes operações de transporte (DENTE; TAVASSZY, 2017).

Mesmo após essa normalização, a intensidade de emissão do cenário hidroviário permanece aproximadamente 78% inferior à rodoviária. Esse resultado indica que a diferença observada nas emissões totais não decorre apenas da pequena variação entre as extensões dos percursos adotados, de 315 km no cenário rodoviário e 310 km no hidroviário, mas principalmente das diferenças de consumo e capacidade operacional consideradas em cada modo.

3.3. Implicações e limites dos resultados

Os resultados indicam que a maior utilização do transporte hidroviário pode contribuir para a redução das emissões operacionais diretas de CO_2 no corredor Porto Alegre–Rio Grande. A redução estimada de aproximadamente 6 mil toneladas de CO_2 evidencia a ordem de grandeza do benefício potencial associado à transferência modal para um mesmo volume de carga, reforçando a relevância da diversificação da matriz de transportes em estratégias de descarbonização.

A magnitude da redução obtida é compatível com evidências anteriores de benefícios ambientais associados à transferência de cargas do modo rodoviário para o hidroviário. Carvalho Junior *et al.* (2026), por exemplo, estimaram redução de aproximadamente 80,5% em outro corredor brasileiro. A proximidade entre os resultados, contudo, não implica equivalência entre os estudos, uma vez que foram consideradas diferentes características de corredor, configurações operacionais e premissas de cálculo. No presente estudo, a redução de 78,31% está condicionada aos parâmetros adotados para capacidade e rendimento dos veículos rodoviários, capacidade efetiva da embarcação, velocidade de navegação e consumo de combustível.

Além disso, a análise considera apenas as emissões diretas de CO_2 associadas ao consumo de combustível no trecho principal de transporte, sem incorporar operações complementares, como acessos aos terminais, transbordos, esperas, reposicionamentos, viagens vazias ou emissões relacionadas ao ciclo de vida. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma comparação ambiental entre cenários operacionais equivalentes, e não como uma avaliação integral das emissões associadas a uma cadeia logística real.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Este estudo comparou as emissões operacionais diretas de CO_2 dos modos rodoviário e hidroviário para o transporte de volume equivalente de carga no corredor Porto Alegre–Rio Grande. A partir do fluxo de veículos comerciais observado e dos parâmetros operacionais adotados, estimou-se um volume de 627.535,70 t no cenário rodoviário, utilizado como referência para o dimensionamento do cenário hidroviário equivalente.

Os resultados indicaram emissão estimada de 7.703,64 t de CO_2 no cenário rodoviário e de 1.670,66 t de CO_2 no hidroviário, correspondendo a uma redução de 6.032,98 t, ou 78,31%. Dessa forma, nas condições estabelecidas pelo modelo, a hipótese da pesquisa foi corroborada, uma vez que o transporte hidroviário apresentou menor emissão operacional de CO_2 para a movimentação do mesmo volume estimado de carga.

Além da diferença nas emissões totais, os indicadores de intensidade confirmaram o melhor desempenho ambiental do cenário hidroviário, com valores de aproximadamente 38,97 g CO_2/(t·km) para o transporte rodoviário e 8,59 g CO_2/(t·km) para o hidroviário. Os resultados evidenciam, portanto, o potencial da transferência modal como estratégia de redução das emissões operacionais no corredor analisado e fornecem uma estimativa quantitativa desse benefício sob condições equivalentes de volume transportado.

Os resultados, entretanto, devem ser interpretados dentro dos limites metodológicos definidos. O estudo utiliza parâmetros representativos de capacidade e consumo, considera utilização integral da capacidade útil dos veículos rodoviários, adota uma barcaça técnica de referência e não incorpora todos os elementos de uma operação logística real, como viagens vazias, tempos portuários, transbordos, acessos aos terminais e emissões de ciclo de vida. Assim, os valores obtidos representam uma comparação entre cenários operacionais e não uma previsão das emissões associadas à substituição integral do transporte rodoviário pelo hidroviário.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se incorporar dados observados de carregamento dos veículos rodoviários, consumo de embarcações efetivamente operantes na hidrovia gaúcha, taxas reais de ocupação e movimentos de retorno ou reposicionamento. A inclusão de custos logísticos, tempos de transporte, operações de acesso e transbordo e emissões em CO_2eq ou em abordagem de ciclo de vida permitiria ampliar a análise para uma avaliação mais abrangente da viabilidade ambiental e operacional da transferência modal no corredor Porto Alegre–Rio Grande.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Mauricio Oliveira de; OLIVEIRA, Leise Kelli de; BORGES, Alan Monteiro; LUZ, Fernanda Catarina Ribeiro da; ARAÚJO, Gracielle Gonçalves Ferreira de. Transportes. In:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Brasil em números 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. p. 341-357. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2/bn_2024_v32_art16.pdf. Acesso em: 1 set. 2026.

BARROS, Bruna Renata Cavalcante de; CARVALHO, Eliezé Bulhões de; BRASIL JUNIOR, Antonio Cesar Pinho. Inland waterway transport and the 2030 agenda: taxonomy of sustainability issues. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 8, art. 100462, 2022. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100462. Acesso em: 1 set. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021. Estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres, referenda a Deliberação CONTRAN nº 246, de 25 de novembro de 2021, e dá outras providências. Brasília, DF: CONTRAN, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao8822021.pdf. Acesso em: 7 set. 2026.

BRASIL. Ministério de Portos e Aeroportos. Após enchentes, hidrovia da Lagoa dos Patos ganha espaço no escoamento de celulose no Rio Grande do Sul. Brasília, DF: Ministério de Portos e Aeroportos, 16 jan. 2026. Atualizado em: 9 fev. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2026/01/apos-enchentes-hidrovia-da-lagoa-dos-patos-ganha-espaco-no-escoamento-de-celulose-no-rio-grande-do-sul . Acesso em: 1 set. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; BRASIL. Ministério dos Transportes. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: ano-base 2024*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; Ministério dos Transportes, 2025. Concepção e organização: Instituto de Energia e Meio Ambiente. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/produto/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios. Acesso em: 7 set. 2026.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Plano Hidroviário Estratégico: relatório do plano estratégico. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2013. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/conteudo/portos-e-transporte-aquaviario/plano-hidroviario-estrategico. Acesso em: 6 set. 2026.

CARVALHO JUNIOR, Mauro Medeiros de; LIMA, Thais de Moura; FÁTIMA, Gustavo Augusto Teixeira de; COSTA, Valéria Xavier da; MIGUEZ, Marcelo Gomes. Análise comparativa em relação às emissões de CO_2eq entre o modo de transporte rodoviário e hidroviário: estudo de caso na BR-493/RJ e hidrovia no rio Guandu. *Geoambiente On-line*, Goiânia, n. 55, 2026. Disponível em: https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/77238. Acesso em: 5 set. 2026.

CONCESSÃO DO SISTEMA AQUAVIÁRIO INTEGRADO DOS PORTOS DO SUL E LAGOA MIRIM. Seção C – Engenharia. [S. l.]: Infra S.A.; Agência Nacional de Transportes Aquaviários; Ministério de Portos e Aeroportos, 2025. 59 p. Data-base: abr. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/noticias/2026/transportes-infraestrutura-saip-sul-mirim-concessao-consulta-publica. Acesso em: 2 set. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Boletins Técnicos CNT: agosto/2026*. Brasília, DF: CNT, 2026. Disponível em: https://www.cnt.org.br/boletins. Acesso em: 6 set. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

DENTE, Sébastien M. R.; TAVASSZY, Lóránt. Policy oriented emission factors for road freight transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017. DOI: 10.1016/j.trd.2017.03.021. Acesso em: 7 set. 2026.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (org.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf. Acesso em: 25 ago. 2026.

GHISOLFI, Verônica; TAVASSZY, Lóránt Antal; CORREIA, Gonçalo Homem de Almeida Rodriguez; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; RIBEIRO, Glaydston Mattos. Dynamics of freight transport decarbonization: a simulation study for Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 127, art. 104020, 2024. DOI: 10.1016/j.trd.2023.104020. Acesso em: 1 set. 2026.

GHISOLFI, Verônica; TAVASSZY, Lóránt Antal; CORREIA, Gonçalo Homem de Almeida; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; RIBEIRO, Glaydston Mattos. Freight transport decarbonization: a systematic literature review of system dynamics models. *Sustainability*, v. 14, n. 6, art. 3625, 2022. DOI: 10.3390/su14063625. Acesso em: 7 set. 2026.

GOHARI, Adel; AHMAD, Anuar Bin; BALASBANEH, Ali Tighnavard; GOHARI, Ali; HASAN, Razi; SHOLAGBERU, Abdulkadir Taofeeq. Significance of intermodal freight modal choice criteria: MCDM-based decision support models and SP-based modal shift policies. *Transport Policy*, v. 121, p. 46-60, 2022. DOI: 10.1016/j.tranpol.2022.03.015. Acesso em: 6 set. 2026.

INFRA S.A. *Panorama do Sistema Ferroviário Brasileiro com foco em carga geral*. Brasília, DF: Infra S.A., 2025. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2025/12/PANORAMA-DO-SISTEMA-FERROVIARIO-BRASILEIRO-14.12.25_.pdf. Acesso em: 6 set. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Volume 2: Energy. Chapter 3: Mobile Combustion. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf. Acesso em: 7 set. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. SHUKLA, P. R. *et al.* (ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/. Acesso em: 5 set. 2026.

JIANG, Meizhi; WANG, Benmei; HAO, Yingjun; CHEN, Shijun; WEN, Yuanqiao; YANG, Zaili. Quantification of CO2 emissions in transportation: an empirical analysis by modal shift from road to waterway transport in Zhejiang, China. *Transport Policy*, v. 145, p. 177-186, 2024. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.10.026. Acesso em: 5 set. 2026.

LARRANAGA, Ana Margarita; ARELLANA, Julian; SENNA, Luiz Afonso. Encouraging intermodality: a stated preference analysis of freight mode choice in Rio Grande do Sul.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 102, p. 202-211, 2017. DOI: 10.1016/j.tra.2016.10.028. Acesso em: 5 set. 2026.

LIU, Lina; LIU, Yifan; ZHU, Yijing; MOMMENS, Koen; WANG, Haikun. Co-benefits in carbon reduction from freight mode shifts under China's 'Clean Air Action'. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 12, art. 124082, 2024. DOI: 10.1088/1748-9326/ad928d. Acesso em: 6 set. 2026.

MCKINNON, Alan C.; PIECYK, Maja I. Measurement of CO_2 emissions from road freight transport: a review of UK experience. *Energy Policy*, v. 37, n. 10, p. 3733-3742, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.07.007. Acesso em: 7 set. 2026.

NASSAR, Raphael Ferrari; GHISOLFI, Verônica; ANNEMA, Jan Anne; VAN BINSBERGEN, Arjan; TAVASSZY, Lóránt Antal. A system dynamics model for analyzing modal shift policies towards decarbonization in freight transportation. *Research in Transportation Business & Management*, v. 48, art. 100966, 2023. DOI: 10.1016/j.rtbm.2023.100966. Acesso em: 6 set. 2026.

OLIVARI, Erika; CABALLINI, Claudia; LLUCH, Xavier. How to calculate GHG emissions in freight transport? A review of the main existing online tools. *Case Studies on Transport Policy*, v. 19, art. 101343, 2025. DOI: 10.1016/j.cstp.2024.101343. Acesso em: 7 set. 2026.

OVERSEAS MARINERS CENTRE 2000 COMPANY LIMITED. Tug, barge, supply, Ro-Pax and offshore vessels: sale and purchase listings. Yangon, Myanmar: OMC2000, [s.d.]. Disponível em: https://www.omc2000.com/images/1.%20TUGBARGESUPPLYRO%20PAXOFFSHORE%20VESSELS.pdf. Acesso em: 7 set. 2026.

PENG, Xin; DING, Yixian; YI, Wen; LAROUSSI, Ilias; HE, Tingkun; HE, Kebin; LIU, Huan. The inland waterway ship emission inventory modeling: the Yangtze River case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 129, art. 104138, 2024. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104138. Acesso em: 5 set. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. *Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul: hidrovias e portos*. 8. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2024. Atualizado em: nov. 2024. Disponível em: https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hidrovias-portos-e-aeroportos. Acesso em: 5 set. 2026.

SARAIVA, Pedro Luis de Oliveira; MAEHLER, Alisson Eduardo; DIAS, Marcelo Fernandes Pacheco. Impactos ambientais e vantagens comparativas do transporte hidroviário em relação a outros modos de transporte no sul do Brasil. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 8, n. 3, p. 499-514, 2015. DOI: 10.5902/1983465911325. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/view/11325. Acesso em: 5 set. 2026.

SOUZA, Felipe Lobo Umbelino de; LARRANAGA, Ana Margarita; PALMA, David; PITOMBO, Cira Souza. Modeling travel mode choice and characterizing freight transport in a Brazilian context. *Transportation Letters*, v. 14, n. 9, p. 983-996, 2022. DOI: 10.1080/19427867.2021.1976011. Acesso em: 6 set. 2026.

VAN DORSSER, Cornelis; VINKE, Frederik; HEKKENBERG, Robert; VAN KONINGSVELD, Mark. The effect of low water on loading capacity of inland ships. *European Journal of Transport*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

and Infrastructure Research, v. 20, n. 3, p. 47-70, 2020. DOI: 10.18757/ejtir.2020.20.3.3981. Acesso em: 7 set. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.