

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

Mauro Medeiros de **Carvalho Junior**¹, Thais de **Moura Lima**², Gustavo Augusto **Teixeira de Fatima**³, Valeria Xavier **da Costa**⁴, Marcelo **Gomes Miguez**⁵.

(1 – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Engenharia Civil (PEC), mauro.medeiros@coc.ufrj.br, <https://orcid.org/0009-0000-4482-9548>; 2 - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Engenharia Civil (PEC), thais.lima@coc.ufrj.br, <https://orcid.org/0009-0008-8679-2745>; 3 – Universidade Federal Fluminense (UFF), gustavo_fatima@id.uff.br, <https://orcid.org/0000-0003-1846-2644>; 4 – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Engenharia de Transportes (PET), valeria.xavier@pet.coppe.ufrj.br, <https://orcid.org/0000-0003-0899-732X>; 5 – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Engenharia Civil (PEC), marcelomiguez@poli.ufrj.br, <https://orcid.org/0000-0003-4206-4013>).

Resumo: O setor de transportes respondeu por cerca de 23% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia em 2019, sendo o modo rodoviário o principal contribuinte, com aproximadamente 73% das emissões setoriais (IPCC, 2022). No Brasil, esse padrão se repete: o transporte rodoviário domina a matriz e concentra a maior parte das emissões de GEE do setor. Nesse contexto, a análise comparativa entre modos alternativos, especialmente o hidroviário, torna-se estratégica para subsidiar políticas de descarbonização do transporte de cargas. Este artigo apresenta uma análise comparativa das emissões de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) entre os modos de transporte rodoviário e hidroviário, com foco em um estudo de caso na BR-493/RJ e na porção final do rio Guandu. O objetivo foi quantificar a redução das emissões de CO_{2eq}, em 2023, ao comparar o transporte de uma mesma carga pela rodovia BR-493/RJ (39,4 km) e por uma possível navegação no rio Guandu (42 km). A metodologia utilizou dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT) de 2023, obtidos no km 116,5 da BR-493/RJ, e definiu um comboio-tipo com capacidade de 250 toneladas para a hidrovía

projetada. O cálculo das emissões de GEEs seguiu a metodologia do IPCC (2006) e fatores do GHG Protocol (2025), desconsiderando a fração de biodiesel do Diesel S10. Os resultados mostram que, para o volume de carga analisado, o transporte rodoviário gerou 20.604,11 toneladas de CO_{2eq}, enquanto o hidroviário estimou 3.705,00 toneladas. Essa diferença representa uma redução de 82,0% nas emissões com a transição para o modo de transporte hidroviário, confirmando seu menor potencial poluidor frente aos gases de efeito estufa.

Palavras-Chave: Hidroviário; Rodoviário; Mudanças Climáticas.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CO_{2eq} EMISSIONS BETWEEN ROAD AND WATERWAY TRANSPORT MODES: A CASE STUDY ON BR-493/RJ AND THE GUANDU RIVER WATERWAY

Abstract: The transport sector accounted for approximately 23% of global energy-related CO₂ emissions in 2019, with road transport representing around 73% of sectoral emissions (IPCC, 2022). In Brazil, this pattern is replicated: road transport dominates the national freight matrix and concentrates the largest share of transport-related GHG emissions. Against this backdrop, comparative analyses between alternative modes — particularly inland waterway transport — become strategically important for informing freight decarbonization policies. This article presents a comparative analysis of carbon dioxide equivalent (CO_{2eq}) emissions between road and waterway transport modes, focusing on a case study on the BR-493/RJ highway and the final section of the Guandu River. The objective was to quantify the reduction in CO_{2eq} emissions in 2023 by comparing the transport of the same cargo via the BR-493/RJ highway (39.4 km) and a potential navigation route on the Guandu River (42km). The methodology used data from the 2023 National Traffic Count Plan (PNCT), obtained at km 116.5 of the BR-493/RJ, and defined a standard convoy with a capacity of 250 tons for the projected waterway. The calculation of GHG emissions followed the methodology of the IPCC (2006) and factors from the GHG Protocol (2025), disregarding the biodiesel fraction in Diesel S10. The results show that, for the analyzed cargo volume, road transport generated 20,604.11 tons of CO_{2eq}, while waterway transport was estimated at 3,705.00 tons. This difference represents an 82.0% reduction in emissions with the transition to the waterway mode, confirming its lower pollutant potential in relation to greenhouse gases.

Keywords: Waterway Transport; Road Transport; Climate Change.

Introdução

O setor de transportes é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo, tendo sido responsável por 8,7 GtCO₂eq em 2019, o que corresponde a 23% das emissões globais relacionadas ao uso de energia (IPCC, 2022). O transporte rodoviário de passageiros e cargas concentra cerca de 73% dessas emissões setoriais, padrão observado tanto em economias avançadas como Estados Unidos, China e União Europeia, quanto em países em desenvolvimento como o Brasil (IPCC, 2022). Diante disso, organismos internacionais e governos têm reconhecido a transição modal, especialmente para modos de menor intensidade de carbono, como o ferroviário e o hidroviário, como uma das estratégias centrais de descarbonização do transporte de cargas. Na União Europeia, o Livro Branco dos Transportes (European Commission, 2011) estabelece metas explícitas de transferência modal: 30% do transporte rodoviário de longa distância (acima de 300km) deve migrar para o ferroviário ou aquaviário até 2030, e mais de 50% até 2050.

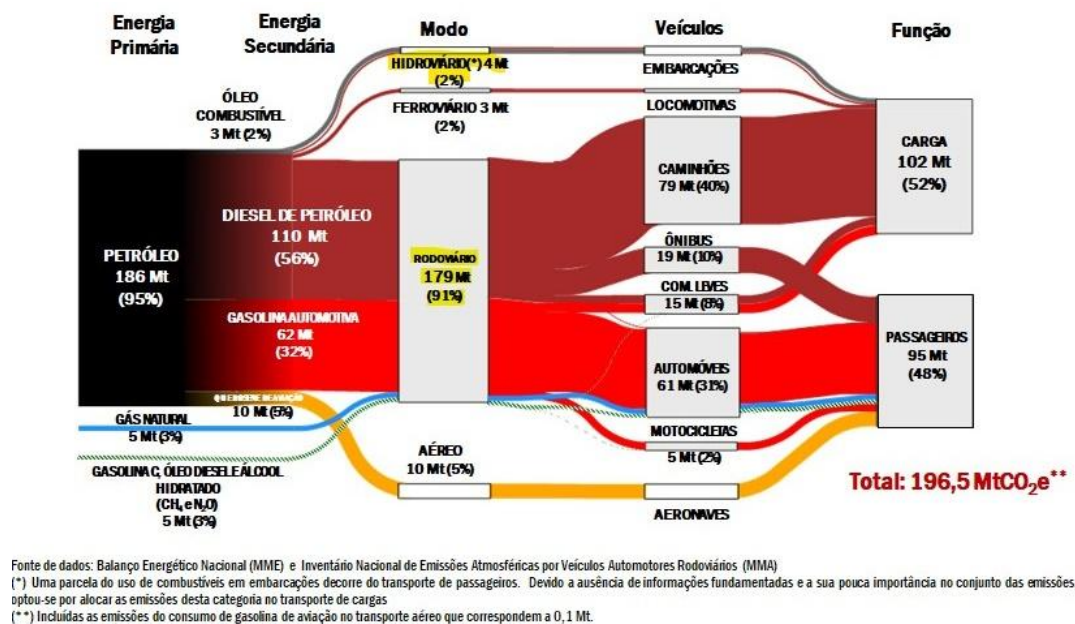
Em 2019, o Brasil contribuiu com 2,2 bilhões de toneladas para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo o setor de energia encarregado por 19% dessas emissões. Especialmente no setor de energia, o setor de transporte se apresenta como o maior emissor de GEE em relação a outras fontes emissoras como Geração de Eletricidade, Consumo Energético Industrial, Produção de Combustíveis e outros. Os modos de transporte, no país, emitiram conjuntamente 196,5 Mt de CO₂eq em 2019, cerca de três vezes mais que as demais fontes emissoras supracitadas, no período entre 1973 e 2019 (IEMA, 2020). Segundo CORBETT (2004), o sistema de transporte hidroviário utiliza menos energia, minimizando assim a emissão de GEE. De forma geral, as embarcações apresentam uma eficiência energética significativamente superior na movimentação de cargas por tonelada-quilômetro, em comparação aos modos de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo.

A Figura 1 apresenta a atuação das emissões de GEE no setor de transportes de acordo com fontes energéticas, modos, veículos e funções. Nesse sentido, há destaque para o modo de transporte hidroviário com participação de 2% de emissão em relação ao modo de transporte rodoviário, que contribuiu com 91% das emissões.

Na literatura internacional, a comparação entre modos de transporte de cargas tem utilizado como métrica padrão as emissões por tonelada-quilômetro (gCO₂eq/tkm), que permite normalizar as diferenças de volume transportado e distância percorrida. A Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2021) demonstrou que o transporte hidroviário interior e o ferroviário

apresentam emissões por tkm significativamente menores do que o transporte rodoviário de carga pesada, confirmando a hierarquia ambiental entre os modos.

Figura 1 - Emissão na atividade de transportes em 2019



Fonte: IEMA, 2020.

Nusa e Kodak (2023), em revisão sistemática comparando transporte aquaviário e rodoviário, reforçam que o primeiro apresenta vantagem ambiental consistente, ressaltando, contudo, que as estimativas variam conforme carga transportada, tecnologia do motor, velocidade de operação e características da via navegável. Esse ponto é central para a metodologia do presente estudo, pois a comparação direta entre modos deve ser interpretada com cautela, já que estes diferem em flexibilidade operacional, capilaridade logística, tipo de carga atendida e requisitos de infraestrutura, isto é, aspectos que vão além da análise de emissões absolutas (EEA, 2021).

A expansão do modo transporte hidroviário pode contribuir para a redução das emissões de GEE, pois apresenta menor taxa de emissão de carbono por tonelada-quilômetro, constituindo uma vantagem em relação aos demais modos de transporte (NUSA & KODAK, 2023). Essa característica torna-o uma opção estratégica no contexto de iniciativas globais para reduzir os efeitos adversos das mudanças climáticas (BANCO MUNDIAL, 2021).

Nesse sentido, buscou-se apresentar um exemplo prático sobre o tema, corroborando a afirmação supracitada. Assim, o estudo de caso proposto foi realizar a comparação das emissões de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) entre o modo de transporte rodoviário e aquaviário, sendo o primeiro aplicado na BR-493/RJ, no trecho entre os quilômetros 84,3 a 123,7, totalizando 39,4km, já o segundo foi aplicado na porção final do rio Guandu, com extensão de 42km, isto é, entre sua foz na Baía de Sepetiba e o entroncamento com a BR-493/RJ, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro. Ainda, cabe a ponderação de que para a hidrovia projetada, como ainda não existe operação, foi utilizado o comboio-tipo adaptado do Manual de Conceitos Técnicos de Barcaças, criado pela União Europeia (Handbook On Technical Barge Concepts, 2018), em consonância com as características do curso d'água em questão e classes de carga.

Apesar do crescente interesse acadêmico pelo tema, identificou-se uma lacuna na literatura nacional quanto à análise quantitativa das emissões de GEE envolvendo hidrovias interiores na Região Sudeste do Brasil, especialmente em trechos com potencial de navegação ainda não operacionalizado. Estudos como o de Barros et al. (2018), que analisaram o corredor Tocantins (BR-153) comparando o transporte rodoviário ao hidroviário com dados do PNCT/DNIT, demonstraram reduções de emissões de CO₂ superiores a 67% com a transição modal, mas estão circunscritos à Região Norte. Não foram encontrados estudos similares para a bacia do Rio Guandu e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Diante dessa lacuna, o presente trabalho parte da hipótese de que o transporte hidroviário no trecho final do rio Guandu, caso operacionalizado, apresentaria emissões de CO_{2eq} significativamente inferiores às verificadas no trecho equivalente da BR-493/RJ, para o mesmo volume de carga transportada, hipótese testada por meio de modelagem baseada em dados empíricos de tráfego rodoviário e consumo de combustível, com aplicação da metodologia do IPCC (2006).

Com efeito, para construção metodológica foram utilizados os dados de monitoramento do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), incluindo os dados de pesagem que são processados e validados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), os quais foram analisados e trabalhados para transformação em informações anuais e com a obtenção da carga útil transportada, tendo sido usado o ano de 2023 como referência para os estudos.

Desta forma, a proposição de inserção da análise de emissões de CO_{2eq}, no planejamento estratégico de diferentes modos de transportes no Brasil, está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tanto a nível nacional quanto global e, em específico,

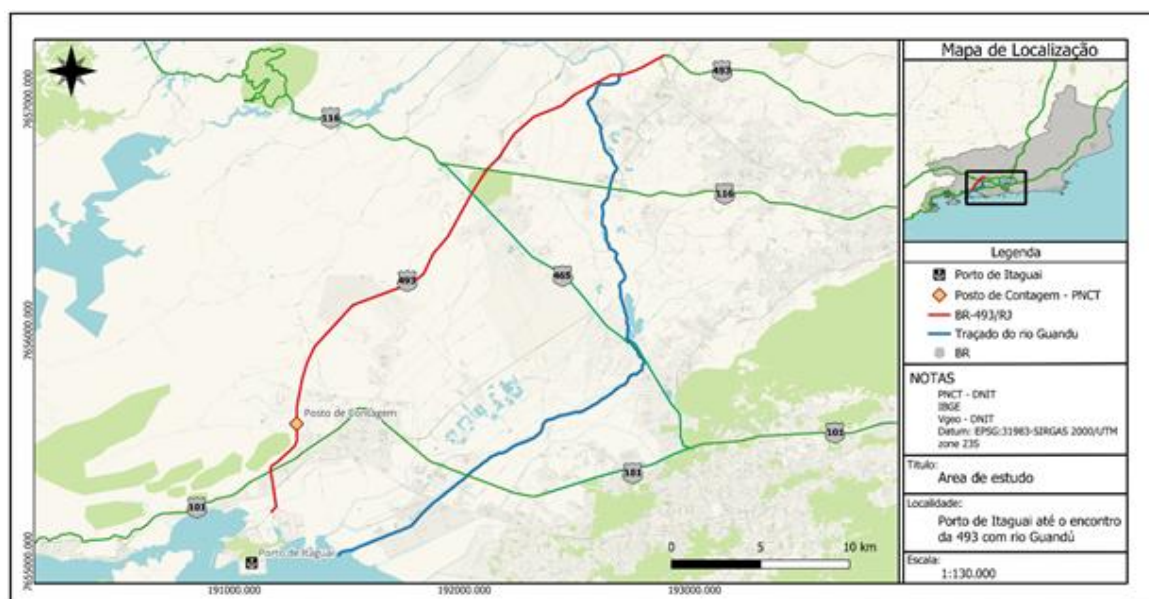
com o ODS 13, que trata da Ação Contra a Mudança Global do Clima, possuindo como uma de suas metas regionalizada a integração da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) às políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

Este artigo tem como objetivo quantificar a redução das emissões de CO₂ equivalente, no ano de 2023, para o estudo de caso na BR-493/RJ, baseada no posto de contagem e pesagem de tráfego existente em Itaguaí, quando comparado o transporte da mesma carga por uma possível navegação no rio Guandu, em um trecho de 42km, isto é, uma hidrovia que interliga a foz do rio Guandu até o entroncamento com a referida rodovia federal.

Material e métodos

A delimitação da área de estudo considerou o trecho final da BR-493/RJ, entre o município de Japeri e a Ilha da Madeira, em Itaguaí, compreendendo os quilômetros 84,3 a 123,7, totalizando 39,4km de rodovia. Para o trecho do rio Guandu, foi considerado o trajeto entre o Porto de Itaguaí e as margens da ferrovia localizada no interior de Japeri, com aproximadamente 42 km de extensão. Esses trechos rodoviários (vermelho) e hidroviário (azul) estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Localização da Área de Estudo



Fonte: Elaboração autores.

A viabilidade técnica da navegação no trecho final do rio Guandu baseia-se nas características hidrológicas e morfológicas da bacia. O rio Guandu apresenta, no trecho considerado entre o Porto de Itaguaí e a BR-493/RJ, largura média superior a 80 metros e é classificado, segundo os critérios da NORMAM-202/DPC (BRASIL, 2024), Norma da Marinha do Brasil para embarcações de navegação interior, como via navegável de águas interiores abrigadas. Com base nessa classificação, são compatíveis embarcações e comboios de pequeno e médio porte, respeitados os gabaritos de calado disponíveis no trecho. Ressalta-se, contudo, que a confirmação definitiva da viabilidade hidroviária para operação comercial demandaria levantamento batimétrico detalhado, avaliação dos trechos com restrições de calado e análise da variação sazonal do nível d'água, aspectos que constituem limitações do presente estudo e que devem ser objeto de investigações complementares, conforme indicado nas recomendações de pesquisas futuras.

Apesar da existência do Porto de Itaguaí na foz do rio Guandu, no seu trecho a montante, objeto deste estudo ainda não há operação hidroviária. Assim, adotou-se, para fins desta análise, um comboio-tipo baseado no Manual de Conceitos Técnicos de Barcaças da União Europeia (Johan et al., 2018).

O DNIT, por meio do PNCT, monitora as tendências e os aspectos operacionais do tráfego nas rodovias federais do Brasil, fornecendo dados para a definição de políticas de construção, manutenção e administração rodoviária. Assim, esse programa possui diversos pontos de contagem, nos quais são coletados dados sobre o volume de tráfego, indicando quantos veículos passam pela rodovia, bem como informações de pesagem para veículos de carga, classificados por classes.

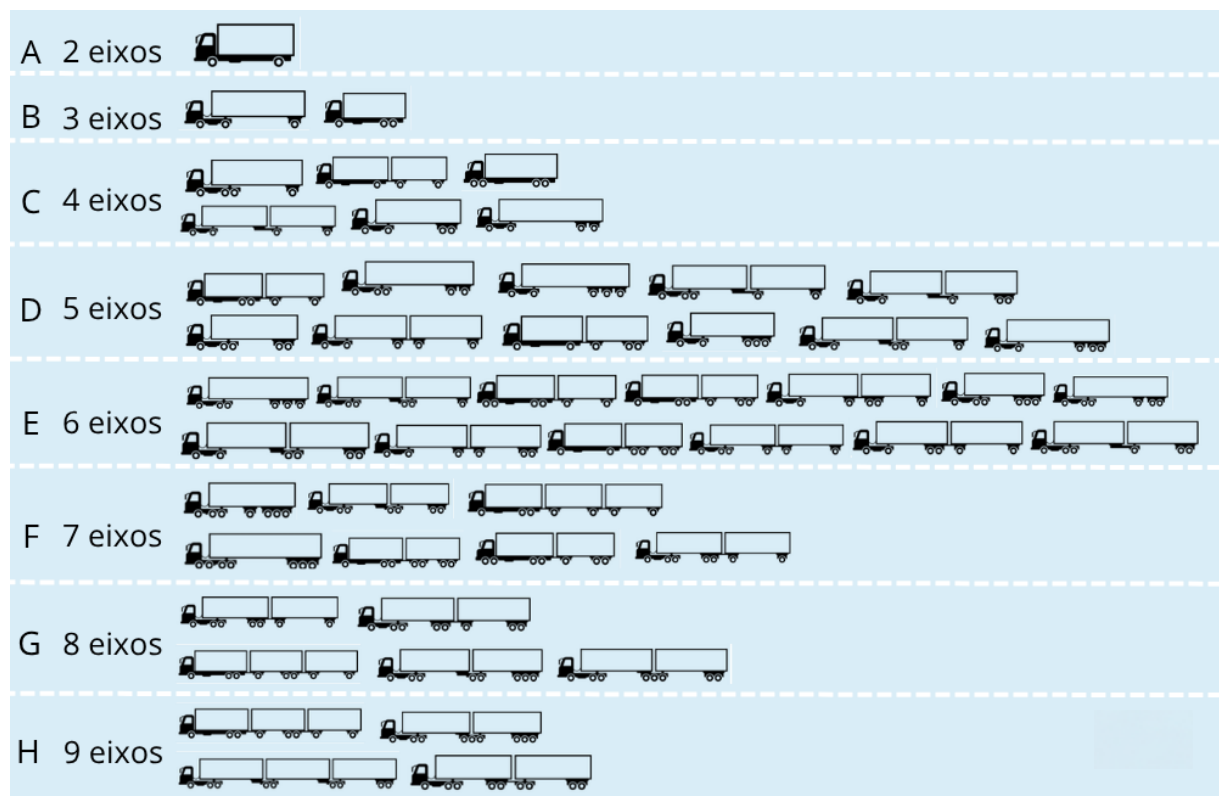
Nessa perspectiva, para a realização deste estudo foram usados os dados coletados no ano de 2023, do posto de pesagem localizado no km116,5 da rodovia BR-493/RJ. Os referidos dados, obtidos e processados no DNIT, contemplaram as cargas transportadas em veículos classificados de acordo com as informações disponibilizada pelo PNCT, enquadrados de A até H (

Nesse sentido, após a obtenção dos dados supracitados, foi realizado o tratamento dos dados de contagem e pesagem, com remoção de *outliers* e a conversão de dados diários em anuais. Ainda, para os cálculos dos parâmetros utilizados no referido trabalho, foram considerados o tráfego em ambos os sentidos da rodovia, crescente (C) e decrescente (D).

Figura 3) e subdividido em quantidade de eixos. No entanto, destaca-se que para este estudo foram considerados somente veículos para transporte de carga, excluindo carros, motos e ônibus.

Nesse sentido, após a obtenção dos dados supracitados, foi realizado o tratamento dos dados de contagem e pesagem, com remoção de *outliers* e a conversão de dados diários em anuais. Ainda, para os cálculos dos parâmetros utilizados no referido trabalho, foram considerados o tráfego em ambos os sentidos da rodovia, crescente (C) e decrescente (D).

Figura 3 - Classes de Veículos PNCT



Fonte: Adaptado de Classes de Veículos PNCT, 2023

Desta forma, a

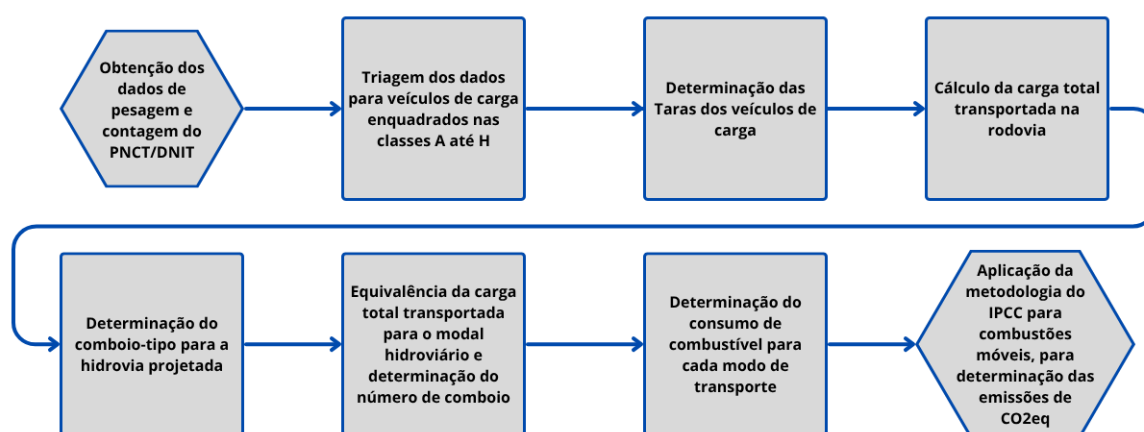
Figura 4 ilustra o fluxo metodológico adotado no presente estudo, cujo detalhamento será apresentado na sequência.

Ainda na manipulação dos dados do PNCT e tendo em vista o cenário proposto, em que as cargas que circularam no trecho de rodovia em estudo seriam transportadas por uma possível hidrovia no rio Guandu, foi necessário calcular a carga útil transportada ao longo do ano, isto

é, a carga realmente transportada sendo descontada a tara de cada classe dos veículos. Para isso, definiu-se a tara dos veículos comerciais, ou seja, o peso dos eixos na condição vazia, e essa foi subtraída do Peso Bruto Total (PBT) registrado pelas balanças.

Cabe destacar que GRIMM e BRITO (2023) apontam, na literatura nacional, que ainda não há consenso sobre as cargas mínimas correspondentes a tara do veículo. Em contrapartida, MEDINA e MOTTA (2015) destacam que a razão entre a carga útil e o PBT, correspondente à lotação máxima permitida pela legislação é, em média, da ordem de 2/3. Assim, a tara dos veículos comerciais equivale, aproximadamente, a 1/3 do PBT.

Figura 4 - Fluxo Metodológico



Fonte: Elaboração autores.

Nesse sentido, para melhor estimativa da tara dos veículos comerciais foram considerados os quatro tipos de eixos definidos na Portaria nº 268 de 14/03/2022 (BRASIL, 2022), a saber: i) eixo simples com rodagem simples (ESRS); ii) eixo simples com rodagem dupla (ESRD); iii) conjunto de eixos tipo tandem duplo (ETD); e, iv) conjunto de eixos com tandem triplo (ETT).

Desse modo, a tara dos veículos componentes da frota comercial foi então calculada atribuindo um veículo-tipo para cada uma das classes no PNCT, adotando-se os seguintes pesos por grupo de eixo: i) ESRS: 2,00 t; ii) ESRD: 3,33 t; iii) ETD: 5,66 t; e, iv) ETT: 8,50 t, conforme apresentado na Equação 1. A definição do veículo-tipo representativo de cada classe do PNCT baseou-se na subcategoria mais frequentemente observada, de forma a refletir o tipo

de veículo mais comum em circulação dentro de cada classe, assegurando maior representatividade e coerência com a composição real da frota.

$$Tara = PESO_{ESRS} \times N^{\circ}_{ESRS} + PESO_{ESRD} \times N^{\circ}_{ESRD} + PESO_{ETD} \times N^{\circ}_{ETD} + PESO_{ETT} \times N^{\circ}_{ETT} \quad (1)$$

Onde:

$PESO_a$ = peso dos eixos, conforme os seguintes grupos: ESRS; ESRD; ETD; e ETT

N°_a = número de eixos com os diferentes grupos existentes

Em seguida, já com a carga útil e a quantidade de veículos de carga compilados, por tipo de eixo e sentido, no ano 2023, para o modo de transporte rodoviário, foi necessário definir a capacidade de transporte do comboio-tipo no rio Guandu, a fim de estimar quantas embarcações seriam necessárias para transportar o mesmo volume de carga. Dada a ausência de referências nacionais sobre o tema, foram utilizados dados do Manual de Conceitos Técnicos de Barcaças da União Europeia (Handbook On Technical Barge Concepts, 2018). Nessa perspectiva, levando em consideração as características do rio Guandu, como largura e calado, foi definido uma embarcação com capacidade de carga de 250 toneladas, em observância às diretrizes da NORMAM-202/DPC (BRASIL, 2024), Norma da Marinha do Brasil para embarcações destinadas à navegação interior.

Após a determinação do número de comboios necessários, foi definido o consumo de combustível para ambos os cenários. Para o modo de transporte rodoviário, foi utilizado os dados de rendimento médio por eixo dos veículos (Quadro 1), expressos em km/l, conforme a Portaria SUROC nº 1, de 8 de janeiro de 2025, publicada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Ressalta-se que esse dado não contempla caminhões de 8 eixos (*), sendo assim, adotou-se uma média entre os rendimentos dos veículos com 7 e 9 eixos.

Quadro 1 - Rendimento médio de consumo de Diesel S10 por cada eixo de veículo.

Consumo Diesel S10 (km/l):	
2 Eixos	3,950
3 Eixos	3,000
4 Eixos	2,650
5 Eixos	2,300
6 Eixos	2,000
7 Eixos	2,000
8 Eixos*	1,863
9 Eixos	1,725

Fonte: ANTT, 2025

Nessa perspectiva, para o modo de transporte hidroviário, o consumo de combustível foi estimado com base em Ribeiro (2021), considerando a potência do motor e a capacidade de transporte do comboio. Para um comboio fluvial, com motor de 800 hp, o consumo foi de, aproximadamente, 12 litros por hora, operando a uma velocidade média de 12,5 km/h.

Na sequência, para o cálculo das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), adotou-se a metodologia descrita no *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2: Energy* (2006), aplicada a fontes de combustões móveis. Para isso, utilizou-se as Equações (2 e 3), que consideram o consumo estimado de combustível (em litros), obtido pelo produto entre a quilometragem percorrida e os parâmetros de autonomia previamente definidos para cada tipo de veículo deste estudo. Esse valor é então multiplicado pelo fator de emissão (EF) correspondente ao tipo de combustível utilizado.

$$Emissão = \sum_a [Combustível Estimado_a \times EF_a] \quad (2)$$

Sendo:

Emissão = Emissões de CO₂ (kg)

Combustível Estimado = Combustível consumido calculado pela Equação (2)

EF = Fator de Emissão (kg/l)

a = tipo de combustível

$$Combustível Estimado = \sum_{i,j} [Veículos \times Distância \times Fator de Consumo] \quad (3)$$

Sendo:

Consumo Estimado = total de combustível estimado usando o dado de distância

Veículos = número de veículos do tipo i, usando o combustível j

Distância = quilômetros anuais viajado (km)

Fator de Consumo = média de combustível consumido (l/km)

i = veículos tipo

j = combustível tipo

Cabe salientar que, para os cálculos das emissões no modo de transporte rodoviário, considerando que o óleo diesel comercializado no Brasil, em 2023, era uma mistura com 10% de biodiesel (B₁₀). Logo, foi necessário descontar essa fração do volume total de Diesel S10 consumido. Tal percentual é estabelecido pela Resolução CNPE nº 12, de 21 de novembro de

2022. Esse ajuste se justifica pelo fato de que a metodologia adotada para o cálculo das emissões, conforme diretrizes do IPCC, não contabiliza as emissões oriundas de biocombustíveis, uma vez que estes são considerados carbono neutro no balanço de emissões.

Os fatores de emissão utilizados foram obtidos do *Greenhouse Gas Protocol* (2025), que fornece padrões e diretrizes amplamente reconhecidos para a contabilização de GEEs. Como ambos os modos de transporte utilizam óleo diesel como combustível, foram considerados os seguintes fatores de emissão: 2,603 kg/L para CO₂, 0,0001 kg/L para CH₄ e 0,00014 kg/L para N₂O. Esses valores foram convertidos para dióxido de carbono equivalente (CO₂Eq), métrica utilizada para equalizar as emissões de vários GEE, com base na relativa importância de cada gás em relação ao CO₂, na produção de uma quantidade de energia (por área unitária) (GHG Protocol, 2025). A conversão utilizada foi de GWP (*Global Warming Potential*) conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Conversão em GWP (Global Warming Potential)

Tipo de Gás	GWP
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	28
Óxido Nitroso (N ₂ O)	265

Fonte: Adaptado de FGVCES (2021)

Além das emissões absolutas em toneladas de CO₂eq, foram calculados indicadores relativos para permitir comparações padronizadas e metodologicamente mais robustas entre os modos de transporte: (i) emissões por tonelada de carga transportada (kgCO₂eq/t), obtidas pela divisão das emissões totais pela carga útil transportada; e (ii) emissões por tonelada-quilômetro (gCO₂eq/tkm), calculadas considerando a distância percorrida em cada modo de transporte. Esses indicadores são amplamente utilizados na literatura internacional de comparação entre os diferentes modos de transporte (EEA, 2021; NUSA & KODAK, 2023) e permitem uma avaliação mais adequada da eficiência ambiental dos modos de transporte, independentemente do volume absoluto de carga transportada.

Com o objetivo de analisar um cenário de equivalência das emissões de CO₂eq entre os modos de transporte rodoviário e hidroviário, manteve-se os parâmetros característicos das embarcações adotadas no dimensionamento inicial, no caso, capacidade de carga, velocidade média de operação e consumo de combustível. Dessa forma, buscou-se quantificar o número de comboios necessários para que o modo hidroviário atingisse um volume de emissões

equivalente ao observado no transporte rodoviário da BR-493/RJ, permitindo, assim, avaliar a capacidade de carga da hidrovia para alcançar o mesmo número de emissão de CO_{2eq}.

Resultados e discussões

Com base nos dados de contagem e pesagem de veículos, referentes ao ano de 2023, no km116,5 da BR-493/RJ, e utilizando a metodologia de quantificação de emissões de carbono adotada pelo IPCC, juntamente com os dados do GHG Protocol 2025, conforme descrito na metodologia, foram estimados os valores de emissões de CO_{2eq} para os dois modos de transporte analisados neste estudo.

Com a aplicação da equação, proposta pelo IPCC, para cálculo das emissões por combustões móveis no modo de transporte rodoviário, foram estimadas 20 mil toneladas de CO_{2eq} para os veículos de 2 a 9 eixos, sendo o sentido decrescente da rodovia (D) de maior emissão, conforme apresentado na Quadro 3. Ainda, nessa contribuição de CO_{2eq}, estão sendo considerados, também, a emissão de 0,85 toneladas de CH₄ e 2,22 toneladas de N₂O ao longo do ano.

Quadro 3 - Contagem de veículos e emissões de carbono para o rodoviário em 2023

Eixos	Contagem de veículos 2023		Consumo de Combustível (L)	Emissões (t CO _{2eq})
	Sentido C	Sentido D		
2	75523	67348	1.414.242,05	3.414,55
3	54275	60188	1.491.834,43	3.601,89
4	47642	40890	1.306.264,60	3.153,85
5	35224	30822	1.122.782,00	2.710,84
6	50109	91501	2.768.475,50	6.684,21
7	5851	6017	232.019,40	560,19
8	137	130	5.605,21	13,53
9	5450	3048	192.621,33	465,06
TOTAL:	274.211	299.944	8.533.844,53	20.604,11

No cálculo das emissões que seriam geradas no modo de transporte hidroviário, foi necessário, primeiro, realizar a análise e o tratamento prévio dos dados de pesagem do trecho em estudo da BR-493. Assim, do Peso Bruto Total (PBT) obtido pela balança foi descontada a tara (Quadro 4), obtendo-se a carga útil transportada no segmento rodoviário de,

aproximadamente, 8 milhões de toneladas. Destaca-se que o sentido decrescente (D) da rodovia foi o que apresentou o maior volume de carga, conforme apresentado na Quadro 5.

Quadro 4 - Tara dos veículos rodoviários de carga por classes e nº de eixos

Nº Eixos	Classes Veículos	Tara (kg)	Nº Eixos	Classes Veículos	Tara (kg)
2	A2	5.330	6	E3	17.650
3	B2	7.660		E4	16.650
	B3	8.660	7	F1	18.980
4	C1	10.990		F2	18.980
	C2	11.490		F3	19.980
	C3	11.990		F4	20.980
	C4	11.990	8	G1	21.820
5	D1	14.198		G2	22.310
	D2	14.320		G3	23.310
	D3	15.320	9	H1	25.650
	D4	14.320		H2	24.640
6	E1	16.820		H3	24.640
	E2	16.650			

Quadro 5 - Cargas transportadas na BR-493/RJ Itaguaí

Eixos	Balança BR493-RJ 2023 (kg)	
	Sentido C	Sentido D
2	356684702	289319240
3	619028683	517376476
4	537811332	380328538
5	584663768	580136761
6	1416037902	2549863964
7	191704884	196844641
8	3293189	4100400
9	245513055	125091608
TOTAL:	3.954.737.515	4.643.061.628

Nesse sentido, para que a metodologia tivesse melhor coerência e eficácia, esta mesma carga útil supracitada, também, foi adotada para estimar as emissões geradas pela possível hidrovía no rio Guandu.

Com a definição dos pesos das cargas que poderiam ser transportadas pela hidrovía, foi estipulado o número de comboios, baseado nos parâmetros previamente estabelecidos na metodologia. Assim, considerando uma capacidade de transporte de carga de 250 toneladas por embarcação, o número calculado de embarcações foi superior a 34 mil, conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Cargas transportadas na Hidrovia Proposta

Sentido	Embarcações	Consumo de Combustível (L)	Emissões (t CO _{2eq})
C	15.819	637.151,87	1.704,19
D	18.572	748.048,49	2.000,80
TOTAL:	34.391	1.385.200,36	3.705,00

Com efeito, de posse do número de veículos do transporte hidroviário planejado, foi aplicado o mesmo método de cálculo de emissões por combustões móveis, utilizado para o modo de transporte rodoviário, porém com a alteração dos parâmetros específicos para este tipo de transporte. Como resultado, obteve-se um total de 3,7 mil toneladas de CO_{2eq} (Quadro 6), nas quais estão contabilizadas 3.605,68 toneladas de CO₂ 0,14 tonelada de CH₄ e 0,36 tonelada de N₂O.

Para fins de comparação padronizada entre os modos de transporte, foram calculados os indicadores relativos de emissão, considerando a soma da carga útil total transportada, nos sentidos C e D (Quadro 5.), e as respectivas distâncias de cada modo de transporte. Os resultados estão apresentados na Quadro 7. Os valores indicam que a vantagem ambiental do hidroviário se mantém tanto em emissões brutas, quanto para os indicadores relativos, com reduções superiores a 80%, também, nas métricas por tonelada transportada e por tonelada-quilômetro. Esse resultado é coerente com os valores reportados na literatura internacional para comparações entre transporte hidroviário interior e rodoviário de cargas (EEA, 2021; NUSA & KODAK, 2023).

Quadro 7 - Indicadores relativos de emissão por modo de transporte (2023)

Indicador	Rodoviário (BR-493)	Hidroviário (Rio Guandu)	Redução (%)
Emissões totais (t CO_{2eq})	20.604,11	3.705,00	82,0%
Carga útil total (t)	8.597.799,14		—
Emissões por tonelada (kgCO_{2eq}/t)	2,40	0,43	82,0%
Emissões por tkm (gCO_{2eq}/tkm)	60,82	10,26	83,1%

Em síntese, para o modo de transporte rodoviário, as emissões de CO_{2eq} foram estimadas em 20.604,11 toneladas, já para o modo de transporte hidroviário a estimativa foi de 3705,00

toneladas, isto é, as emissões para o modo de transporte rodoviário são, aproximadamente, 5 vezes maior que as do hidroviário.

Para a análise de equivalência das emissões de CO₂eq entre os modos de transporte rodoviário e hidroviário, mantendo-se constantes os parâmetros do comboio-tipo adotado, os resultados indicaram que seriam necessárias 191.226 embarcações para igualar o volume de emissões gerado pelo modo do transporte rodoviário, o que representa um acréscimo de 156.835 embarcações em relação ao cenário inicial, ou seja, um aumento de 456% na capacidade de carga. Esse resultado evidencia que o modo de transporte hidroviário é capaz de transportar um volume de carga significativamente superior ao rodoviário para um mesmo patamar de emissões de CO₂eq, reforçando a maior eficiência ambiental quando avaliado sob a perspectiva das emissões por unidade de carga transportada.

Conclusões

- Os dados apresentados no presente artigo reforçam, para o cenário modelado, a premissa de que o modo de transporte hidroviário tende a apresentar menor potencial poluidor em termos de emissões de GEE. No estudo de caso em questão, a modelagem indicou uma redução estimada de 82,0% nas emissões de CO₂eq ao se comparar o transporte da mesma carga pelo modo de transporte rodoviário (BR-493/RJ) e pela hidrovía projetada no rio Guandu, em percursos de extensão similar, resultado confirmado também pelos indicadores relativos de emissões por tonelada transportada e por tonelada-quilômetro. Além disso, a análise de equivalência de emissões revelou que o hidroviário precisaria movimentar até 456% mais carga do que o cenário inicial para igualar as emissões de CO₂eq do modo de transporte rodoviário, reforçando a vantagem ambiental da hidrovía sobre o modo rodoviário.
- É fundamental ressaltar, contudo, que esses resultados se referem a um cenário hipotético modelado com base em dados do ano de 2023 e parâmetros técnicos estimados para uma hidrovía ainda não operacional, não devendo ser interpretados como afirmação de que a substituição do modo de transporte produziria automaticamente essa redução em condições reais de operação.
- Na prática, a substituição no modo de transporte não ocorre de forma isolada, dado que os modos de transporte rodoviário e hidroviário diferem em termos de flexibilidade

operacional, capilaridade logística, custos de infraestrutura e perfil de carga atendida. A análise aqui realizada é de natureza comparativa e paramétrica, e contribui com evidências quantitativas para o debate sobre a viabilidade ambiental da navegação interior na bacia do Guandu. Não obstante, os resultados reforçam a importância do desenvolvimento e do incentivo à infraestrutura de transporte hidroviário no Brasil, como estratégia para ampliar a participação desse modo de transporte na matriz de transporte e contribuir para a redução das emissões setoriais de GEE, em alinhamento com os compromissos nacionais e internacionais de mitigação das mudanças climáticas, incluindo a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

- Em pesquisas futuras, recomenda-se: (i) realizar levantamento batimétrico detalhado do rio Guandu para confirmar a viabilidade técnica e operacional da navegação comercial no trecho analisado, com proposição de medidas estruturais, tais como: a elevação de pontes e construção de eclusas e barragens de nível; (ii) aprimorar as especificações das embarcações e do comboio-tipo, preferencialmente a partir de dados de hidrovias já em operação no Brasil, como a Hidrovia do Madeira ou a Hidrovia Tietê-Paraná; (iii) comparar os resultados obtidos com estudos existentes para outros corredores nacionais, de modo a ampliar a base empírica sobre emissões em comparações com os diferentes modos de transporte na Região Sudeste; e (iv) desenvolver análises integradas de custo-benefício que incorporem dimensões econômicas, sociais e ambientais da eventual transição do modo de transporte no trecho estudado.

Referências

- Banco Mundial. (2021). *Jal Marg Vikas Project: transforming inland water transport in India*. <https://www.worldbank.org>
- Barros, B. R. C. de, Carvalho, E. B. de, Melo, W. C. de, Santos, E. B. dos, & Brasil, A. C. de M. (2018). *Comparação de emissão de CO₂ entre os modos rodoviário e hidroviário no corredor logístico norte – eixo Tocantins*. In *Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.

https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Aspectos%20Economicos%20Sociais%20Politicos%20e%20Ambientais%20do%20Transporte/Transporte%20e%20Meio%20Ambiente%20I/5_81_AC.pdf

Brasil. Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2025, 8 de janeiro). *Portaria SUROC n° 1*. Diário Oficial da União.

Brasil. Conselho Nacional de Política Energética. (2022, 21 de novembro). *Resolução CNPE n° 12*. Diário Oficial da União.

Brasil. Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. (2024). *Portaria DPC/MB/DGN n° 126: NORMAM-202/DPC (Mod.1)*. <https://assets.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dpc/normam/normam-202.pdf>

Brasil. Ministério da Infraestrutura. Secretaria Nacional de Transportes Terrestres. (2022, 14 de março). *Portaria n° 268*.

Brasil. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023). *Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT)*. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/contagem-de-trafego>

Corbett, J. J. (2004). Marine transportation and energy use. *Encyclopedia of Energy*, 3, 745–758.

European Commission. (2011). *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area — Towards a competitive and resource-efficient transport system*. Publications Office of the European Union. https://transport.ec.europa.eu/white-paper-2011_en

European Environment Agency. (2021, 24 de março). *Rail and waterborne — best for low-carbon motorised transport* [Briefing]. <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport/rail-and-waterborne-best>

- FGVCES. (2021). *Nota técnica: valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 2.0*. FGV EAESP. <https://hdl.handle.net/10438/31764>
- GHG Protocol, World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2025). *Fatores de emissão do GHG Protocol — Brasil 2025*. <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>
- Grimm, H. F., & Brito, L. A. T. (2023). Nível de carga de veículos comerciais em rodovias federais concedidas. *Transportes*, 31(1). <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2849>
- Instituto de Energia e Meio Ambiente. (2020, dezembro). *As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019*. <https://energiaeambiente.org.br/as-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-em-2019-20201201>
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy* (Eggleston, H. S. et al., Eds.). IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III — Chapter 10: Transport* (Jaramillo, P., Kahn Ribeiro, S., Newman, P. et al.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.012>
- Johan, L., Andrius, S., Stefan, B., & Boris, K. (2018). *Handbook on technical barge concepts for use under BSR specific navigation conditions*. https://project-emma.eu/sites/default/files/EMMA_Act.%202.2.%20Report_final/index.pdf
- Medina, J., & Motta, L. M. G. (2015). *Mecânica dos pavimentos* (1ª ed.). Interciência.
- Nusa, K., & Kodak, G. (2023). Comparison of maritime and road transportation in emissions perspective: A review article. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(2), 48–60.

Ribeiro, E. S. (2021). *Diretrizes para determinação do comboio tipo de uma via navegável* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-20122021-111010/publico/ElcioSilvaRibeiroCorr21.pdf>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Mauro Medeiros de Carvalho Junior: elaboração, escrita, coleta e análise de dados; Thais de Moura Lima: elaboração, escrita, análise de dados e geração de figuras; Gustavo Augusto Teixeira de Fatima: editoração, organização e análise de dados; Valeria Xavier da Costa: editoração, organização e análise de dados; Marcelo Gomes Miguez: supervisão, mentoria e revisão.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.