

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS/GV
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO**

Paola de Oliveira Badroca

**Eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil: uma aplicação da
Análise Envoltória de Dados (DEA)**

Governador Valadares

2024

Paola de Oliveira Badroca

**Eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil: uma aplicação da
Análise Envoltória de Dados (DEA)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Administração do Instituto de Ciências Sociais Aplicadas/GV da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Administração.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Rodrigues

Governador Valadares

2024

Paola de Oliveira Badroca

**Eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil: uma aplicação da
Análise Envoltória de Dados (DEA)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Administração do Instituto de Ciências Sociais Aplicadas/GV da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Administração.

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Carlos Rodrigues - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo Lemos da Silveira Santos
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Nádia Carvalho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais que me inspiram e me auxiliaram nesta realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e fé que me sustentaram durante toda essa caminhada.

Aos meus pais e meu irmão, pelo apoio incondicional, pelo carinho, paciência e por acreditarem nos meus sonhos, mesmo nas situações mais difíceis.

A todos os docentes do curso de Administração da UFJF-GV, por compartilharem conhecimento e por serem parte fundamental da minha formação acadêmica.

Ao meu professor orientador, Antonio Carlos Rodrigues, por toda a orientação, dedicação e pelos valiosos conselhos ao longo desse processo.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante o curso, especialmente à Amanda, pela parceria e apoio em todas as etapas dessa jornada.

Por fim, ao meu noivo, Israel, que me acompanhou e apoiou com carinho, compreensão e incentivo nos momentos em que mais precisei.

A todos vocês, minha gratidão eterna.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA). Foram analisados dados disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) entre os anos de 2019 a 2022, referentes a 12 concessionárias ferroviárias. Para o estudo, foram selecionadas as variáveis quantidade de locomotivas, número de trens formados e quantidade de vagões como *inputs*, enquanto a Tonelada Quilômetro Útil (TKU) e o número de acidentes foram considerados *outputs* nos modelos DEA CCR e BCC. Os resultados indicam que, das 45 DMUs avaliadas, 5 atingiram a eficiência máxima no modelo CCR, e 10 foram eficientes no modelo BCC. Ferrovias como Rumo Malha Sul, Rumo Malha Paulista e Estrada de Ferro Paraná-Oeste operaram em escala ótima em determinados anos, destacando-se como as mais eficientes do país. As demais concessionárias apresentaram ineficiências técnicas e de escala, sugerindo a necessidade de melhorias na gestão e na produção.

Palavras-chave: Análise Envoltória de Dados; DEA; Ferrovias de Carga; Análise de Eficiência.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the productive efficiency of freight railways in Brazil using Data Envelopment Analysis (DEA). Data made available by the National Land Transport Agency (ANTT) between the years 2019 and 2022 were analyzed, referring to 12 railway concessionaires. For the study, the variables number of locomotives, number of trains formed and number of wagons were selected as inputs, while the Useful Tonne Kilometer (TKU) and the number of accidents were considered outputs in the DEA CCR and BCC models. The results indicate that, of the 45 DMUs evaluated, 5 reached maximum efficiency in the CCR model, and 10 were efficient in the BCC model. Railways such as Rumo Malha Sul, Rumo Malha Paulista and Estrada de Ferro Paraná-Oeste operated on an optimal scale in certain years, standing out as the most efficient in the country. The other concessionaires presented technical and scale inefficiencies, suggesting the need for improvements in management and production.

Keywords: Data Envelopment Analysis; DEA; Freight Railways; Efficiency Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação da extensão das linhas ferroviárias por cada 10 mil habitantes.....	19
Figura 2 – Participação na Matriz de Transportes.....	20
Figura 3 – Produtividade (medida em Tonelada por Quilômetro Útil — TKU).....	21
Figura 4 – Índice de Acidentes.....	21
Figura 5 – Investimentos na malha concedida à iniciativa privada.....	22
Figura 6 – Mapa Ferroviário Brasileiro.....	23
Figura 7: Fronteira BCC. Orientação input.....	40
Quadro 1 - Combinações de Insumos e Produtos com Rendimentos Constantes e Variáveis de Escala.....	44
Figura 8 - Coeficientes de correlação.....	46
Figura 9 - Boxplot dos inputs e outputs utilizados.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução da malha ferroviária no período de 1860 a 2003.....	16
Tabela 2 - Revisões Metodológicas.....	30
Tabela 3 - Estatística Descritiva dos Inputs e Output.....	45
Tabela 4 - Escores de Eficiência dos Modelos DEA CCR e DEA BCC.....	48
Tabela 5 - Classificação da DMU segundo a eficiência de escala.....	50
Tabela 6 - Estatística Descritiva dos escores DEA CCR, DEA BCC e SE.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análise Envoltória de Dados)
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivo Específico	13
3 REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1 Ferrovias no Brasil: Contextualização	13
3.1.1 <i>Histórico das ferrovias do Brasil</i>	14
3.1.2 <i>Setor de transporte de cargas brasileiro</i>	18
3.1.3 <i>Ferrovias de carga brasileiras sob concessão</i>	22
3.1.3.1 Ruma Malha Norte - RMN	23
3.1.3.2 Ruma Malha Oeste – RMO	24
3.1.3.3 Rumo Malha Paulista S.A. – RMP	24
3.1.3.4 Rumo Malha Sul S.A. – RMS	24
3.1.3.5 Estrada de Ferro Carajás - EFC	25
3.1.3.6 Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM	25
3.1.3.7 Ferrovias Centro Atlântica - FCA	25
3.1.3.8 Estrada de Ferro Paraná-Oeste - EFPO (Ferroeste)	25
3.1.3.9 Ferrovia Tereza Cristina - FTC	26
3.1.3.10 MRS Logística S.A. – MRS	26
3.1.3.11 Transnordestina Logística S.A. – FTL	26
3.1.3.12 Ferrovia Norte Sul Tramo Norte - FNSTN	26
3.2. Estudos de Eficiência de Ferrovias	27
3.3. Análise Envoltória de Dados	34
3.3.1. <i>Modelos Clássicos</i>	35
3.3.1.1. CCR	35
3.3.1.2. Forma Linear do Modelo CCR	36
3.3.1.3. Modelo DEA-CCR orientado a output	37
3.3.1.4. Modelo DEA-CCR orientado a input	37
3.3.1.5. BCC	38
3.3.1.6. Modelo DEA-BCC orientado a output	38

3.3.1.7. Modelo DEA-BCC orientado a input	39
3.3.1.8. Eficiência de Escala	39
3.3.1.9. Variáveis Indesejáveis	41
4 METODOLOGIA	41
4.1 Delineamento da Pesquisa	41
4.2 Unidade de Análise	42
4.3 Coleta de Dados	42
4.4 Variáveis de Pesquisa	43
4.5 Análise de Dados	44
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
5.1 Análise Descritiva dos Dados	44
5.2 Análise dos Modelos de Eficiência	47
5.3 Eficiência de Escala	49
6 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A	58

1 INTRODUÇÃO

No panorama do transporte de carga no Brasil, as ferrovias sempre representaram um elemento crucial para a movimentação eficiente de *commodities* e bens. Desde suas primeiras implementações até a atual configuração de concessões privadas, o sistema ferroviário passou por transformações significativas, tanto em termos de gestão quanto de impacto na infraestrutura logística nacional.

A transição do controle estatal para a administração privada foi uma mudança marcante que visava revitalizar um setor afetado por baixos investimentos e desafios estruturais ao longo dos anos. Embora a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) realize o monitoramento do desempenho das ferrovias de carga por meio de uma variedade de indicadores, incluindo medidas de produtividade parciais, e faça a análise do cumprimento das metas estabelecidas, quando se busca os relatórios de avaliação dos níveis de eficiência das concessões ferroviárias, não consta uma investigação aprofundada dos níveis de eficiência das ferrovias brasileiras.

Diante disso, é importante ressaltar que a avaliação de eficiência das ferrovias é crucial para assegurar a qualidade na operação, evitando a subutilização dos recursos disponíveis. Esse processo verifica se as ferrovias geram resultados adequados, o que permite a continuidade das operações. Neste sentido, este trabalho busca responder a seguinte pergunta de pesquisa: “Qual a eficiência das empresas de concessão das ferrovias no Brasil considerando os desempenhos operacionais?”

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica quantitativa utilizada para avaliar a eficiência relativa de unidades produtivas, como empresas ou serviços, com base em múltiplos inputs (recursos utilizados) e outputs (resultados obtidos). Essa metodologia é amplamente aplicada em estudos de eficiência por sua capacidade de lidar com múltiplos fatores de desempenho sem a necessidade de especificar uma função de produção predefinida. No contexto das concessões ferroviárias, a DEA permite identificar quais ferrovias operam de maneira mais eficiente, utilizando melhor seus recursos disponíveis para maximizar a produtividade.

Ademais, esta pesquisa contribui para a literatura especializada de três maneiras distintas. Em primeiro lugar, ela amplia o conhecimento ao explorar a

aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), preenchendo uma lacuna significativa na literatura que carece de referências teóricas sobre a análise da eficiência do sistema ferroviário brasileiro utilizando a metodologia. Em segundo lugar, demonstra a relevância do tema ao aprofundar a compreensão dos parâmetros operacionais que influenciam a eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil. Por fim, os resultados deste trabalho trazem à tona elementos que enriquecem a análise e formulação de políticas apropriadas capazes de estimular a competitividade do setor ferroviário.

Este estudo foi conduzido em doze ferrovias concedidas que atuam em diferentes mercados e regiões do país nos anos de 2019 a 2022. Os dados foram coletados através do banco de dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e posteriormente foi aplicada a metodologia DEA (Análise Envoltória de Dados), com abordagem, predominantemente, quantitativa.

Este trabalho está organizado em seis partes. No Tópico 1, a introdução contextualiza o tema. No Tópico 2, os objetivos do trabalho. Em seguida, no Tópico 3 foi feita a revisão de literatura. O Tópico 4 detalha a metodologia utilizada. O Tópico 5 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta para avaliar a eficiência das ferrovias de carga brasileiras. E, por fim, no Tópico 6, são apresentadas as conclusões.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência produtiva das ferrovias de cargas no Brasil por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA).

2.2 Objetivo Específico

- Descrever o setor de transporte de cargas ferroviárias no Brasil
- Identificar principais *inputs* e *outputs* a serem utilizados na avaliação de eficiência das ferrovias

- Mensurar a eficiência produtiva das ferrovias de carga através dos modelos de eficiência constante e variável de escala.
- Avaliar a eficiência de escala das ferrovias.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Ferrovias no Brasil: Contextualização

As primeiras ferrovias de cargas no Brasil foram construídas no início do século XIX e tinham como principal função o transporte de *commodities* como: café, cana de açúcar, soja, milho e minério de ferro. (Mattos, 1990). Até o ano de 1992, esse modo de transporte estava sob responsabilidade do governo, mas atualmente a maior parte dessa responsabilidade recai sobre o setor privado.

Tais mudanças foram tomadas devido ao processo de desestatização da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A que enfrentava uma séria deterioração de sua infraestrutura e superestrutura em seus principais segmentos, resultante de uma redução significativa nos investimentos e no crescimento econômico. Com base nisso, entre os anos de 1996 e 1998, foram concedidos para o setor privado cerca de 25.895 quilômetros de ferrovias destinadas ao transporte de carga. No momento atual, a administração e operação dessa malha é realizada por 12 concessões distintas, cada uma atuando em mercados e regiões diferentes e transportando uma variedade de cargas pesadas, como minérios, produtos siderúrgicos, produtos agrícolas, fertilizantes, entre outros.

3.1.1 Histórico das ferrovias do Brasil

Até a chegada das ferrovias no Brasil, o transporte terrestre de mercadorias era extremamente precário e dependia principalmente do uso de burros e estradas de chão para chegada aos portos (DNIT, 2016). Diante disso, e pelo fato de ter a capacidade de transportar um volume maior de produtos em longas distâncias, o governo, no século XIX, promulgou uma série de benefícios fiscais destinados a incentivar a construção de ferrovias. Com os incentivos governamentais, a construção das ferrovias contou com uma grande participação do capital privado internacional (Buri et al., 2006).

A primeira concessão do Governo Imperial para a construção e exploração de uma linha férrea foi concedida em 1852, para o financista e industrial Irineu Evangelista de Souza, Barão e Visconde de Mauá. O projeto previa uma estrada que partiria do Porto de Estrela, no fundo da Baía da Guanabara, iria até a Raiz da Serra, perto de Petrópolis, prosseguiria até o Vale do Paraíba e, posteriormente, a Minas Gerais (De Paula, 2000).

No entanto, pode-se dizer que esta ferrovia teve importância unicamente histórica pois não trouxe retorno econômico sobre os locais por onde passava. Frente a isso, e ao aumento da importância do café para a economia brasileira, o governo elaborou um plano ambicioso para a construção de uma ferrovia que ligasse o Vale do Paraíba ao porto do Rio de Janeiro. Mas esse plano não se concretizou conforme o previsto, uma vez que a empresa encarregada da construção do trecho enfrentou dificuldades financeiras, levando o governo a assumir a responsabilidade pela conclusão dos trabalhos (Boiteux, 2014).

Em 1897, o governo interrompeu todos os trabalhos e decretou a tomada sob sua gestão de todas as linhas ferroviárias cujas concessionárias possuíam garantias onerosas de pagamento de juros em ouro. Após a estabilização da situação financeira em 1903, o país embarcou em uma nova etapa de expansão ferroviária, adotando o sistema de contratos com pagamentos em títulos (Shoppa, 2011).

Contudo, o início da Primeira Guerra Mundial provocou um aumento significativo da inflação no país, o que teve um impacto negativo no desempenho das empresas ferroviárias brasileiras. Com a guerra, os custos dos bens de consumo e de capital (material rodante, combustíveis, equipamentos etc), em sua maioria importados, aumentaram, assim como os custos de vida dos ferroviários (Lanza, 2020).

Com o advento da industrialização na década de 1930, as ferrovias, que anteriormente serviam exclusivamente para o transporte de matérias-primas, passaram a tornar-se obsoletas, uma vez que se revelaram inadequadas para lidar com o substancial aumento na quantidade de carga gerada por esse processo (Boiteux, 2014).

Portanto, devido aos custos inferiores associados à construção de rodovias, essa opção se mostrava mais viável para atender às demandas de transporte, especialmente considerando os elevados investimentos necessários para

estabelecer redes ferroviárias. Esse cenário acabou impulsionando o crescimento do transporte rodoviário de cargas (Buri et al., 2006).

Ao examinar os dados apresentados na tabela a seguir, torna-se evidente que a rede ferroviária brasileira alcançou seu ponto máximo de extensão por volta da década de 60, atingindo a marca de 38.287 quilômetros. Isso nos leva a concluir que a declinação do setor ferroviário no Brasil coincidiu com o período de rápido crescimento industrial, que ocorreu dos anos 1950 aos anos 1970 do século XX (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Evolução da malha ferroviária no período de 1860 a 2003.

Ano	Quilômetragem
1860	223
1870	745
1880	3.398
1890	9.973
1900	15.316
1910	21.326
1920	28.535
1930	32.478
1940	34.252
1950	36.681
1960	38.287
1970	32.102
1980	29.659
1990	29.833
1998	28.168
2003	29.706

Fonte: (Boiteux, 2014).

Em 1952, devido às dificuldades financeiras enfrentadas pelas ferrovias, o governo federal propôs ao Congresso Nacional a criação de uma empresa estatal que unificaria as 18 estradas de ferro federais, totalizando aproximadamente 37.000 km de linhas em todo o país (DNIT, 2016). Então, em 1957 foi criada a RFFSA (Rede Ferroviária Federal S/A) com o intuito de organizar e não permitir que o setor ferroviário entrasse em decadência (Silveira, 2002).

Entretanto, durante o governo de Juscelino Kubitschek, ocorreu não apenas a legalização da RFFSA, mas também a intensificação do transporte rodoviário no Brasil. A RFFSA implementou melhorias significativas nas ferrovias do país, incluindo a redução de perdas, déficits e o aumento do transporte de cargas, além de modernizar a rede ferroviária (Silveira, 2007). No entanto, esses avanços não conseguiram impedir a decadência do setor, principalmente devido à concorrência com o sistema rodoviário, que incluía rodovias federais, estaduais e municipais (Silveira, 2002).

Com o início do período militar, os planos de desenvolvimento, denominados como Planos de Desenvolvimento Nacional (PND), impulsionaram a expansão do sistema rodoviário, enquanto tiveram um impacto mais modesto no desenvolvimento do setor ferroviário (Silveira, 2007). O transporte rodoviário oferecia uma vantagem significativa em termos de tempo. Por exemplo, na rodovia Presidente Dutra, enquanto o trem levava 12 horas para percorrer a distância de 400 quilômetros, os ônibus conseguiam fazer o mesmo percurso em apenas 6 horas (Boiteux, 2014).

De acordo com dados disponíveis no portal do Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2016), durante o período entre 1980 e 1992, os investimentos federais nas redes ferroviárias nacionais, notadamente nos sistemas pertencentes à Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), sofreram uma significativa redução. Em 1989, o montante investido na RFFSA representou apenas 19% do valor alocado na década anterior. Com a escassez de investimentos, a RFFSA enfrentava dificuldades em gerar recursos suficientes para quitar as dívidas acumuladas ao longo dos anos anteriores.

Nesse cenário de incapacidade de sustentar o nível de investimentos essencial para manter e fortalecer a atividade ferroviária no Brasil, o governo optou por dar início ao processo de desestatização da rede ferroviária, incorporando a RFFSA ao Programa Nacional de Desestatização, por meio do Decreto n.º 473/92. Com essa medida, marcou-se o início da transferência gradual de suas malhas para a iniciativa privada, com um período de concessão inicial de 30 anos, passível de prorrogação por mais 30 anos (ANTT, 2017). O propósito consistia em delegar a administração do setor ferroviário ao setor privado, o qual se encarregaria de efetuar investimentos com o intuito de reverter a situação de declínio nesse segmento.

Dessa forma, o processo de privatização no setor ferroviário entre 1996 e 1998 concedeu 25.895 quilômetros de ferrovias destinadas ao transporte de carga a

empresas privadas. Para supervisionar e regulamentar a prestação do serviço, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) foi estabelecida em 2001. A criação da ANTT permitiu a regulamentação das sanções e dos direitos e obrigações nos contratos de concessão. Os contratos não exigem investimentos pré-definidos às concessionárias, mas abrangem diversos aspectos, incluindo objeto, modo de prestação, qualidade do serviço, tarifas, direitos dos usuários, fiscalização, penalidades, extinção da concessão e bens reversíveis. A ANTT desempenha um papel fundamental na regulação e fiscalização para garantir o cumprimento da legislação e dos interesses públicos nesse setor (Guerra, 2019).

Dos anos 2020 em diante, a administração e operação da rede ferroviária no Brasil é conduzida por 12 concessões distintas, que consistem em empresas privadas operando trechos concedidos pelo Estado. Esses trechos podem ser compostos por malhas ferroviárias resultantes da desestatização da RFFSA, malhas construídas dentro do escopo das próprias concessões ou malhas financiadas com recursos públicos

Desde o início dessas concessões até dezembro de 2022, foram investidos mais de R\$92 bilhões em valores correntes, o que equivaleria a mais de R\$156 bilhões se atualizados pelo IPCA. Esses recursos foram direcionados principalmente para melhorias e recuperação da infraestrutura ferroviária, aquisição e modernização do material rodante, adoção de novas tecnologias, capacitação profissional e melhoria das operações, entre outras áreas (ANTF, 2022).

Até o momento, o Brasil já possui requerimentos e autorizações para a construção de mais de 22 mil km de novas ferrovias, com investimentos previstos na ordem de R\$295 bilhões, potencialmente gerando 3,6 milhões de empregos em todo o país. O próximo ano promete um aumento significativo no número de ferrovias concedidas em todo o território nacional, impulsionado pela publicação da Lei nº 14.273/2021, recentemente regulamentada pela Resolução ANTT nº 5.987/2022, que permite a exploração de ferrovias pela iniciativa privada (ANTT, 2022).

3.1.2 Setor de transporte de cargas brasileiro

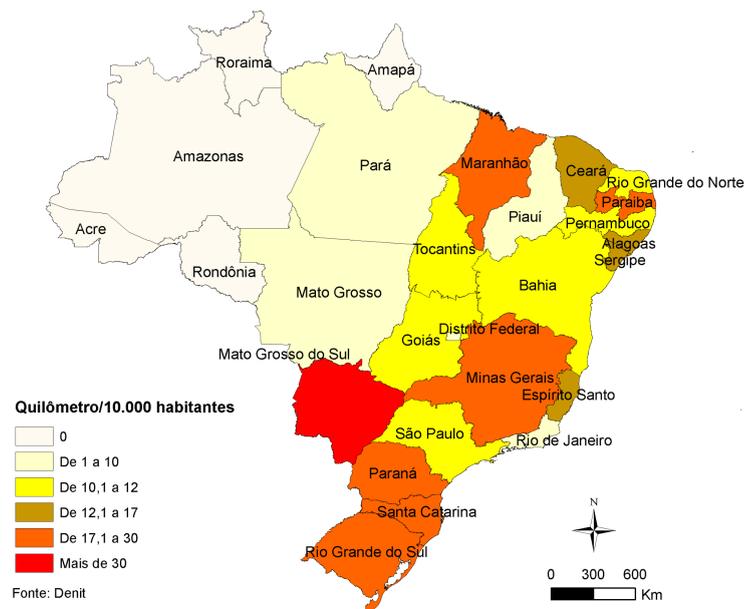
A privatização das ferrovias, que se iniciou na década de 90, tinha como objetivo principal a significativa melhoria nos serviços oferecidos no transporte de carga ferroviária. No entanto, apesar dos avanços observados em vários aspectos

do setor ferroviário, como o crescimento na produção e a queda nas taxas de acidentes, entre outros, como exploraremos detalhadamente mais adiante neste tópico, o tamanho da rede ferroviária brasileira permaneceu relativamente inalterada desde o início das concessões na década de 1990. Como mostra os dados no site do DNIT onde a extensão da malha concedida na concessão era de 25.895 Km totais e atualmente a extensão da malha ferroviária é de aproximadamente 30.000 km.

Além disso, é notório que o Brasil enfrenta desafios na distribuição de sua rede ferroviária, uma vez que apresenta uma malha relativamente reduzida e de baixa densidade, especialmente na região Norte. Estados como Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná se destacam por terem as maiores densidades de ferrovias por habitante na região Sul.

Na Figura 1 abaixo, é possível visualizar a distribuição da extensão da rede ferroviária em quilômetros por cada 10.000 habitantes

Figura 1 – Relação da extensão das linhas ferroviárias por cada 10 mil habitantes.

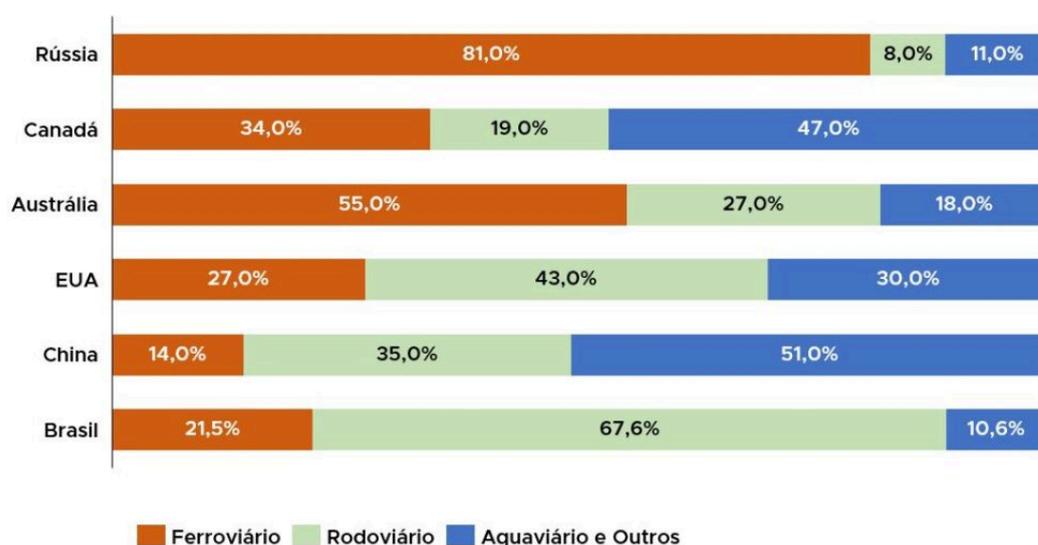


Fonte: IPEA (2009)

O Brasil, com 8,5 milhões de quilômetros quadrados de extensão territorial, está entre os cinco maiores países do mundo em termos de área geográfica (IBGE, 2024). No entanto, quando se trata de possuir uma infraestrutura ferroviária suficientemente desenvolvida para sustentar sua produção, facilitar o deslocamento da população e impulsionar a economia, a realidade é diferente. De acordo com dados da ANTF (2022), apenas 21,5% do sistema de transporte brasileiro é composto por ferrovias, enquanto mais de 67,6% é dominado por rodovias.

Em comparação com outros países, a participação da rede ferroviária brasileira no setor de transportes é notavelmente inferior. Tanto naqueles com dimensões continentais, como a Rússia e a China, quanto em nações menores a densidade da malha ferroviária supera a do Brasil. O sistema ferroviário brasileiro, conforme descrito pela INFRA (2020), é caracterizado por uma malha de baixa densidade, com destaque para o transporte de *commodities*, como minerais e produtos agrícolas, voltado para corredores de exportação e com pouca integração ao sistema logístico nacional.

Figura 2 – Participação na Matriz de Transportes



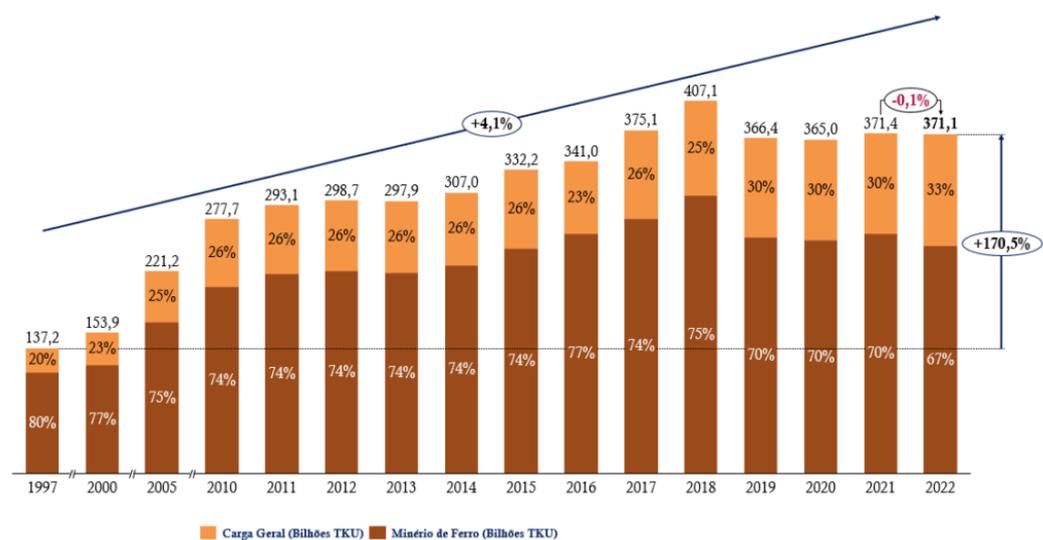
Fonte: ANTF (2022)

A cobertura territorial limitada das ferrovias e a subutilização da capacidade ferroviária existente, que se concentra em corredores específicos, resultam na baixa contribuição desse setor para a matriz de transporte. Isso, por sua vez, prejudica a

eficiência logística e reduz a competitividade do país, especialmente devido às extensas distâncias entre os portos e os principais centros de produção de *commodities*.

Contudo, é possível afirmar que os dados demonstram melhorias substanciais em certas áreas no período após a privatização. De 1997 a 2022, a produção ferroviária aumentou de 137,2 bilhões de TKU (toneladas-quilômetros úteis, obtido multiplicando a carga útil transportada pela distância de transporte) para 371,1 bilhões de TKU, representando um crescimento de 170,5%.

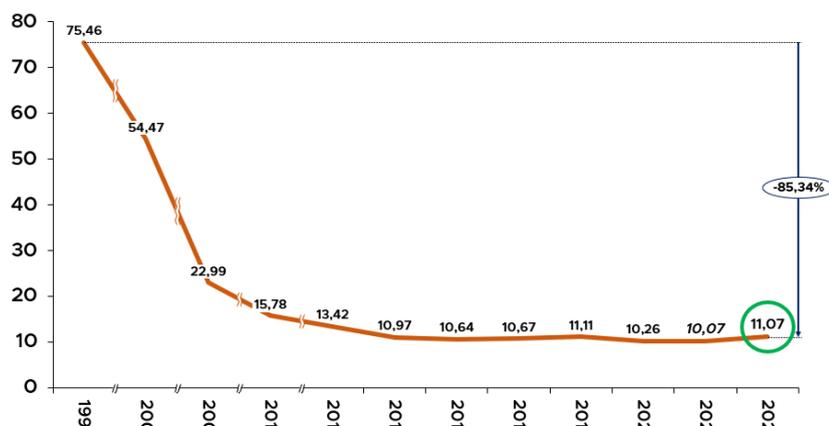
Figura 3 – Produtividade (medida em Tonelada por Quilômetro Útil — TKU)



Fonte: ANTF (2022)

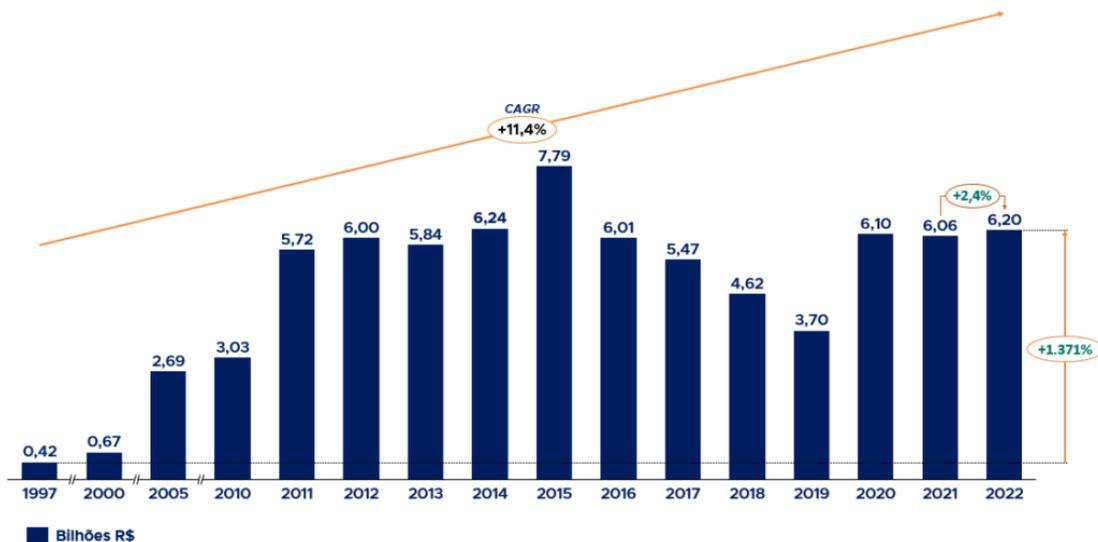
O índice de acidentes, por outro lado, reduziu de 75,5 acidentes por milhão de trens-quilômetro em 1997 para 11,07 acidentes por milhão de trens-quilômetro em 2022.

Figura 4 – Índice de Acidentes



Fonte: ANTF (2022)

Figura 5 – Investimentos na malha concedida à iniciativa privada



Fonte: ANTF (2022)

Assim, pode-se dizer que o aumento na produção de carga e a diminuição das taxas de acidentes nas ferrovias brasileiras resultaram diretamente do aumento dos investimentos feitos pelas concessionárias. Esses investimentos aumentaram de R\$412 milhões em 1997 para alcançar R\$6,2 bilhões em 2022, atingindo um pico de R\$7,79 bilhões em 2017 (conforme ilustrado na Figura 3.5).

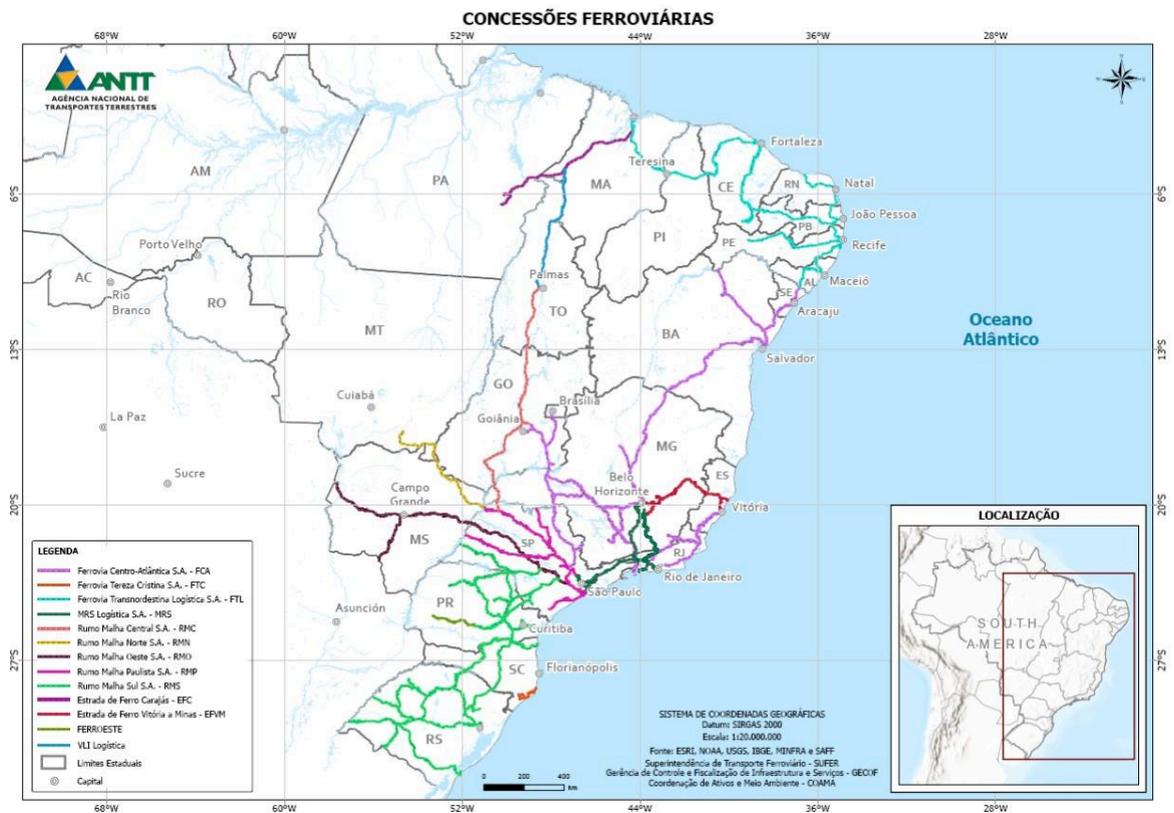
3.1.3 Ferrovias de carga brasileiras sob concessão

O Sistema Ferroviário Brasileiro se estende atualmente, por cerca de 30.000 quilômetros, abrangendo diversas regiões do país, como Sul, Sudeste, Nordeste, Centro-Oeste e parte do Norte. Desse extenso sistema, segundo Caldas et al (2012), o que equivalente a impressionantes 95% da rede, estão concedidos para operação, sendo que uma única concessionária estatal, a VALEC - Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., administra a Ferrovia Norte-Sul Tramo Norte. As

outras 11 concessões ferroviárias são geridas por empresas privadas e são operadas e administradas pelas seguintes concessionárias:

- Rumo Malha Norte – RMN
- Rumo Malha Oeste – RMO
- Rumo Malha Paulista – RMP
- Rumo Malha Sul – RMS
- Estrada de Ferro Carajás - EFC
- Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM
- Ferrovia Centro Atlântica - FCA
- Estrada de Ferro Paraná-Oeste – EFPO (Ferroeste)
- Ferrovia Tereza Cristina - FTC
- MRS Logística S.A. – MRS
- Ferrovia Transnordestina Logística S.A. – FTL

Figura 6 – Mapa Ferroviário Brasileiro



Fonte: ANTT (2016)

A seguir, serão apresentados detalhadamente os aspectos de cada uma das ferrovias.

3.1.3.1 Rumo Malha Norte - RMN

A Rumo Malha Norte (RMN) é uma ferrovia que se estende ao longo de dois trechos distintos. O primeiro trecho tem início nas margens do Rio Paraná, onde se conecta com a ferrovia Rumo Malha Paulista (RMP), e se estende até o município de Chapadão do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul. O segundo trecho parte de Chapadão do Sul e se estende até Alto Araguaia, também em Mato Grosso do Sul. No total, a extensão da malha ferroviária é de 735,3 Km (ANTT, 2022).

3.1.3.2 Rumo Malha Oeste – RMO

A Rumo Malha Oeste presta serviços ferroviários nos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo, abrangendo uma extensa rede ferroviária que totaliza 1.973,1 quilômetros. A RMO estabelece conexões cruciais com as ferrovias RMS, RMP, e também se conecta à Empresa Ferroviária Oriental, que se encontra em território boliviano. Além disso, a RMO atende aos terminais hidroviários localizados em Porto Esperança - MS e Ladário - MS (ANTT, 2022).

3.1.3.3 Rumo Malha Paulista S.A. – RMP

A ferrovia Rumo Malha Paulista opera em territórios dos estados de São Paulo e Minas Gerais, cobrindo uma extensão total de 2.119,2 quilômetros. Ela possui interconexões vitais com outras quatro ferrovias, nomeadamente a FCA, MRS, RMO e RMN. Além disso, essa malha ferroviária presta serviços aos portos de Santos - SP, Pedeneiras - SP e Panorama - SP (ANTT, 2022).

3.1.3.4 Rumo Malha Sul S.A. – RMS

A empresa Rumo Malha Sul (RMS) presta seus serviços nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo, abrangendo uma extensa rede

ferroviária que totaliza 7.223,4 quilômetros, praticamente toda em bitola métrica. A RMS possui conexões estratégicas com quatro outras ferrovias: RMO, FERROESTE, AFE - Administración de Ferrocarriles del Estado no Uruguai e Ferrocarril Mesopotamico General Orquiza na Argentina (ANTT, 2022).

3.1.3.5 Estrada de Ferro Carajás - EFC

A Estrada de Ferro Carajás, sob a operação da empresa mineradora VALE (anteriormente conhecida como Cia. Vale do Rio Doce), estende-se por um comprimento total de 996,7 quilômetros. Essa ferrovia atravessa os estados do Pará e Maranhão e estabelece conexões importantes com outras infraestruturas ferroviárias, incluindo a Ferrovia Transnordestina Logística S.A. (FTL) e a Ferrovia Norte-Sul (FNS), além de se conectar ao terminal portuário localizado na Ponta da Madeira, no Maranhão (ANTT, 2022).

3.1.3.6 Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM

A Companhia Vale do Rio Doce obteve a concessão para operar a Estrada de Ferro Vitória Minas, que se estende por uma extensão total de 894,2 quilômetros. Essa empresa atua nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais, mantendo conexões cruciais com as ferrovias MRS e FCA. Além disso, a Estrada de Ferro Vitória Minas oferece serviços de transporte ferroviário para o Porto de Tubarão, localizado no Espírito Santo (ANTT, 2022).

3.1.3.7 Ferrovias Centro Atlântica - FCA

A Ferrovia Centro-Atlântica S.A. foi concedida a operação da Malha Centro-Leste em 1996. Essa ferrovia presta serviços nos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Sergipe, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e no Distrito Federal, abrangendo uma extensão total de 7.856,8 quilômetros. Ela estabelece conexões com outras importantes ferrovias, incluindo a EFVM, MRS, TLISA e RMP, e mantém vínculos fundamentais com os seguintes portos: Angra dos Reis - RJ, Aracaju - SE, Aratu - BA e Salvador - BA (ANTT, 2022).

3.1.3.8 Estrada de Ferro Paraná-Oeste - EFPO (Ferroeste)

A Ferroeste - Estrada de Ferro Paraná-Oeste S.A. (EFPO) é uma empresa de propriedade estatal sob o controle do Governo do Estado do Paraná. Ela opera na região abrangendo os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, mantendo uma rede ferroviária com extensão de 248,1 quilômetros. Esta ferrovia estabelece interconexões com a malha ferroviária da RMS e presta serviços de transporte ferroviário que atendem ao Porto de Paranaguá, localizado no Paraná (ANTT, 2022).

3.1.3.9 Ferrovia Tereza Cristina - FTC

A Ferrovia Tereza Cristina S.A. opera exclusivamente no estado de Santa Catarina, abrangendo uma extensão total de 161,6 quilômetros. Esta ferrovia não possui conexões com outras linhas ferroviárias, mas mantém uma ligação importante com o Porto de Imbituba, localizado em Santa Catarina (ANTT, 2022).

3.1.3.10 MRS Logística S.A. – MRS

A MRS conquistou a concessão por meio do leilão da malha sudeste, que possui uma extensão total de 1.821,3 quilômetros. A área de operação dessa concessão engloba os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, incluindo conexões essenciais com os portos do Rio de Janeiro - RJ, Sepetiba - RJ e Santos - SP. Além disso, a MRS mantém interconexões estratégicas com as ferrovias FCA, EFVM e RMP (ANTT, 2022).

3.1.3.11 Ferrovia Transnordestina Logística S.A. – FTL

A Ferrovia Transnordestina Logística S.A. (FTL) atua em uma vasta região que engloba os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Sua malha ferroviária concedida possui uma extensão de 4.295,1 quilômetros. A FTL estabelece conexões com a EFC e, embora tenha uma interconexão com a FCA, esta última não se encontra em funcionamento atualmente. Além disso, a ferrovia está conectada a diversos portos importantes, como Pecém - CE, Itaqui - MA, Mucuripe - CE, Recife - PE, Suape - PE e Cabedelo -

PB. Vale ressaltar que as ligações com o Porto de Maceió - AL estão interrompidas, e a conexão com o Porto de Natal - RN está inativa (ANTT, 2022).

3.1.3.12 Ferrovia Norte Sul Tramo Norte - FNSTN

A Ferrovia Norte Sul Tramo Norte (FNSTN) possui aproximadamente 720 quilômetros de extensão ligando o município de Açailândia, no estado do Maranhão, até o município de Porto Nacional, no estado do Tocantins. Este trecho foi projetado para facilitar o transporte de cargas entre as regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, conectando importantes polos produtores a portos e outros modais de transporte (ANTT, 2022).

3.2. Estudos de Eficiência de Ferrovias

O crescimento econômico de um país está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento de diversos setores, notadamente o comércio e a indústria, que desempenham um papel significativo na composição do Produto Interno Bruto (PIB). Para possibilitar este crescimento, é fundamental considerar o transporte de carga como um elemento essencial, uma vez que ele desempenha um papel crucial na facilitação das atividades comerciais. Devido à sua importância vital na economia, a pesquisa sobre a eficiência do transporte de carga, especialmente no contexto do transporte ferroviário, tem atraído o interesse de diversos estudiosos, como mostrado na Tabela 2.

Com o intuito de aprofundar essa questão, a seguir, serão apresentados alguns dos estudos que abordam a eficiência do transporte ferroviário de cargas, utilizando a metodologia da Análise Envoltória de Dados, destacando suas contribuições e insights.

No período de 2001 a 2008, Cantos, Pastor e Serrano (2012) conduziram uma avaliação de eficiência em 23 ferrovias europeias, empregando a metodologia DEA. Os critérios de entrada considerados foram o número de funcionários, a extensão da linha ferroviária, o número de material circulante, enquanto as variáveis de saída incluíram a tonelada por quilômetro e os passageiros por quilômetro. Quatro ferrovias alcançaram o nível máximo de eficiência. A pesquisa indica que os sistemas ferroviários mais eficientes estão presentes nos países onde as principais

reformas, como a separação vertical e a introdução de novos operadores, já foram concluídas.

Kutlar, Kabasakal e Sarikaya (2012) conduziram uma avaliação de eficiência em 31 ferrovias de diversos países, abrangendo o período de 2000 a 2009. Para esta análise, utilizaram uma série de indicadores de entrada, incluindo o número de funcionários, a extensão da linha ferroviária, o número de vagões de carga, o número de vagões de passageiros, o número de veículos de tração e o custo operacional anual. Os indicadores de saída considerados foram a tonelada por quilômetro, o passageiro por quilômetro, a tonelada transportada, o número de passageiros transportados e a receita anual. Foi concluído que cinco ferrovias mantiveram consistentemente um alto nível de eficiência, enquanto outras cinco empresas demonstraram ineficiência ao longo dos dez anos.

De Castro et al. (2017), empregou-se a metodologia DEA BCC *output* para calcular a eficiência de doze ferrovias brasileiras no transporte de carga. O objetivo era avaliar o quanto as concessionárias poderiam produzir com os recursos disponíveis. Os resultados revelaram a existência de cinco ferrovias eficientes, caracterizadas por apresentar uma eficiência média relativamente alta e uma distinção notável entre elas. É importante notar que a amostra analisada era heterogênea, com diferentes tamanhos de bitola e transporte de uma variedade de produtos. No entanto, os autores não conseguiram chegar a uma conclusão definitiva sobre os fatores que influenciaram essas ferrovias a atingirem níveis de eficiência tão diversos.

Wanke et al. (2018), foram realizados estudos com o objetivo de investigar os fatores que impulsionam o desempenho ferroviário em países asiáticos, para isso utilizaram o modelo MNDEA. O MNDEA viabiliza a identificação de fraquezas particulares e pontos fortes das ferrovias, destacando quais atividades são realizadas com maior eficiência. Além disso, proporciona a capacidade de calcular como as ferrovias que compartilham infraestrutura dividem suas operações entre diferentes atividades.

Silva, Macambira e Rocha (2019) utilizaram os métodos clássicos de DEA (CCR, BCC) para analisar a eficiência produtiva de onze concessionárias do sistema ferroviário brasileiro de carga no período de 2006 a 2011. Para isso, utilizaram como variáveis de *input*: número de trens formados; consumo de combustível; utilização de locomotiva; utilização de vagão; e número de empregados. Quanto às variáveis

de saída, analisaram as toneladas por quilômetro útil. Os resultados revelaram que as ferrovias que se especializaram no transporte de *commodities* minerais e agrícolas possuem níveis mais elevados de eficiência produtiva do que as ferrovias que atuam no transporte de carga geral ou containerizada e de graneis líquidos.

Fontan, Rosa e Lacruz (2021) conduziram uma análise utilizando o modelo DEA CCR com o objetivo de comparar a eficiência relativa de doze ferrovias especializadas no transporte de minério de ferro (MFe) e pelotas (PLMFe) no ano de 2016. Algumas das variáveis utilizadas como *input* são: despesas realizadas na operação ferroviária; investimento realizados na ferrovia; quantidade de acidentes; quantidade de funcionários empregados na operação ferroviária; quantidade de vagões em operação, etc. Quanto às variáveis de saída, analisaram as toneladas por quilômetro útil e tonelada útil. Como resultado, concluiu-se que das doze ferrovias avaliadas, três delas foram identificadas como eficientes em relação às demais.

Tabela 2 - Revisões Metodológicas

Artigo	Objetivo	País	Período	DMU	Método	Inputs	Output
Santos (2011)	Avaliar a eficiência produtiva das ferrovias de carga brasileiras.	Brasil	2006 a 2009	Brasil (12)	DEA (CCR, BCC)	As frotas de locomotivas e vagões, o pessoal total empregado e a extensão da malha ferroviária.	A quantidade de carga útil transportada por cada concessionário (em tonelada útil).
Cantos, Pastor e Serrano (2012)	Analisar a eficiência ferroviária de 23 ferrovias europeias.	Europa	2001 a 2008	Europa (23)	DEA (CCR, BCC)	Número de funcionários, a extensão da linha ferroviária e o número de material circulante.	Tonelada por quilômetro e os passageiros por quilômetro.

Continua

Cont. Tabela 2.

Kutlar, Kabasakal e Sarikaya (2012)	Analisar a eficiência de 31 ferrovias de carga e de passageiros em diversos países.	Mundial	2000 a 2009	Mundial (31)	DEA (CCR, BCC)	Número de funcionários, extensão da linha ferroviária, o número de vagões de carga e de vagões de passageiros, o número de veículos de tração e o custo operacional anual.	Tonelada por quilômetro, o passageiro por quilômetro, a tonelada transportada, o número de passageiros transportados e a receita anual.
De Castro et al. (2017)	Analisar a eficiência de doze ferrovias brasileiras no transporte de carga.	Brasil	2011 a 2013	Brasil (12)	DEA BCC output	Extensão da malha, frota total de vagões e de locomotivas, quantitativo de mão de obra, custo operacional, e investimento total.	Tonelada por quilômetro e os passageiros por quilômetro.

Continua

Cont. Tabela 2.

Wanke et al. (2018)	Analisar a eficiência ferroviária em países asiáticos selecionados usando um novo modelo MNDEA de supereficiência para saídas variadas.	China, Japão, Tailândia, Vtiênã, Malásia, Mianmar e Indonésia	China (2005-2013), Japão, Tailândia, Vietnã, Malásia, Mianmar e Indonésia (2004-2014)	China (162), outros países asiáticos (66)	MNDEA	Energia, número de empregados, capacidade do trem em peso, carga e passageiro.	Acidente e receita.
Silva, Macambira e Rocha (2019)	Analisar a eficiência produtiva de 11 concessionárias do sistema ferroviário brasileiro.	Brasil	2006 a 2011	Brasil (11)	DEA (CCR, BCC)	Número de trens formados, consumo de combustível, utilização de locomotiva, utilização de vagões e número de empregados.	Toneladas por quilômetro útil.

Continua

Cont. Tabela 2.

Fontan, Rosa e Lacruz (2021)	Comparar a eficiência relativa de doze ferrovias especializadas no transporte de minério de ferro (MFe) e pelotas (PLMFe).	Brasil	2016	Brasil (12)	DEA CCR	Despesas na operação ferroviária; investimento realizados na ferrovia; quantidade de acidentes; quantidade de funcionários empregados na operação ferroviária; quantidade de vagões em operação.	Toneladas por quilômetro útil e tonelada útil
------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	------	-------------	---------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

3.3. Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica não paramétrica que visa medir a eficiência de unidades tomadoras de decisão (DMUs) que convertem múltiplos insumos em diversos produtos (Mello, 2003). Uma das vantagens da técnica DEA reside no fato de que esse modelo é não paramétrico. Diferentemente dos modelos paramétricos, a DEA não requer a estimativa dos parâmetros de uma função para a fronteira de eficiência. Em vez disso, o cálculo da eficiência é realizado comparando as unidades de melhor desempenho, conhecidas como eficientes, com as demais DMUs analisadas. Ademais, a metodologia DEA, também conhecida como Data Envelopment Analysis (DEA), avalia o desempenho de DMUs homogêneas usando múltiplas entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) se concentrando em criar um único indicador de desempenho a partir de diversas medidas diferentes (DORES, 2016).

Nas últimas décadas, segundo Guerreiro (2007), houve um aumento notável na utilização dos modelos DEA para avaliar o desempenho de uma ampla variedade de entidades envolvidas em diversas atividades, contextos e países. Essas aplicações têm empregado as DMUs de maneiras diversas para avaliar o desempenho de empresas, nações, regiões e muito mais. A viabilidade dessas aplicações se deve, em grande parte, ao fato de que os modelos DEA impõem poucas premissas, o que os torna adequados para casos nos quais outras abordagens não seriam aplicáveis devido à complexidade, muitas vezes desconhecida, das relações entre os múltiplos *inputs* e *outputs* envolvidos nas DMUs. Além disso, os modelos DEA também têm desempenhado um papel significativo em estudos relacionados a benchmarking, permitindo a identificação de diversas fontes de ineficiência em empresas (Silva et.al., 2019).

A modelagem da Análise Envoltória de Dados (DEA) foi desenvolvida por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978, e desde então, pesquisadores de diversos campos reconheceram sua facilidade de aplicação na modelagem de processos operacionais para avaliação de desempenho. Charnes et al (1978), em seu trabalho expandiram o estudo inicial de Farrell (1957), em que foram analisados os problemas das medidas parciais de eficiência.

A técnica DEA difere dos métodos paramétricos, pois otimiza cada observação individualmente, comparando-a com as demais para determinar a

fronteira de eficiência. Ao contrário dos métodos paramétricos, que buscam otimizar um único plano de regressão aplicado a todas as observações, a DEA oferece essa abordagem individualizada.

Outra vantagem notável da técnica DEA é a ausência da necessidade de suposições sobre a distribuição das variáveis, uma vez que se trata de uma técnica não paramétrica. Além disso, permite a geração de um indicador único de eficiência ao considerar diversos insumos e produtos, sem a obrigatoriedade de pré-definir uma função de produção. Essa flexibilidade se estende tanto aos insumos quanto aos produtos, permitindo múltiplas entradas e saídas na análise de eficiência (Silva et.al., 2019).

Ademais, é fundamental destacar que o método DEA possibilita a avaliação da eficiência relativa por meio de dois enfoques distintos: a orientação para os insumos (*input*), que visa a minimizar os *inputs*, mantendo um nível de *output* fixo; e a orientação para os produtos (*output*), na qual se busca maximizar os *outputs*, mantendo os *inputs* constantes. Um índice de eficiência igual a 1 indica que a unidade de tomada de decisão (DMU) em análise é eficiente. Essas abordagens permitem analisar um grande número de insumos e produtos, gerando uma classificação da eficiência relativa que, por sua vez, oferece diversas alternativas para tomada de decisões administrativas (Ferreira e Gomes, 2020)

3.3.1. Modelos Clássicos

Existem dois modelos clássicos de DEA: o modelo CCR (Constant Returns to Scale) e o modelo BCC (Variable Returns to Scale). A principal diferença entre esses modelos está na determinação dos retornos de escala. O modelo CCR assume retornos constantes de escala, enquanto o modelo BCC permite retornos variáveis de escala. A seguir estes modelos serão explorados em maior profundidade, assim como a eficiência de escala.

3.3.1.1. CCR

O primeiro modelo, conhecido como o modelo CCR, recebeu seu nome em homenagem aos seus criadores, Charles, Cooper e Rhodes, e foi introduzido por eles em 1978. Esse modelo se destaca por adotar a suposição de Constant Returns

to Scale (CRS), o que significa que ele considera modelos de escala constantes. O principal objetivo do modelo CCR é maximizar a razão entre a combinação linear dos *outputs* e a combinação linear dos *inputs*, gerando assim um índice de eficiência que varia de 0 a 1.

Levando em consideração os insumos X_i (*input* X de cada unidade i) e os resultados Y_j (*output* Y de cada unidade j), o índice de eficiência é determinado pela relação entre a combinação linear dos *outputs* e a combinação linear dos *inputs* de uma DMU específica. A eficiência de uma DMU é calculada por meio do seguinte problema de programação:

$$\text{Max } W_A = \frac{\sum_j u_j Y_{jA}}{\sum_i v_i X_{iA}}$$

Sujeito a: Modelo (1) – Programação não-linear

$$\frac{\sum_j u_j Y_{jK}}{\sum_i v_i X_{iK}} < 1 \quad k = 1, \dots, n$$

$$u_i \geq 0, \forall j$$

$$v_i \geq 0, \forall i$$

onde: u_i - pesos dos *outputs*; v_i - pesos dos *inputs*; Y_{jK} - vetor de *outputs* da unidade A; X_{iK} - vetor de *inputs* da unidade A.

Na modelagem mencionada, u e v são utilizados como fatores de ponderação ou multiplicadores associados aos *outputs* (produtos) e *inputs* (insumos). Conforme a convenção do método, todos os índices devem estar entre 0 e 1. Essa modelagem pode ser transformada na equação do modelo de Programação Linear, como descrito no Modelo 1 - Programação Linear, produzindo a mesma solução do exemplo anterior, porém permite uma abordagem numérica menos exaustiva.

3.3.1.2. Forma Linear do Modelo CCR

Se no modelo previamente apresentado impõe-se que o denominador das duas frações seja igual a 1, pode-se afirmar, sem redução de generalidade, que o modelo ilustrado abaixo, equivale a um modelo de programação linear, com uma formulação matemática menos rigorosa.

3.3.1.3. Modelo DEA-CCR orientado a output

$$\text{Max } w_A = \sum_{j=1}^s u_j Y_{jA}$$

Sujeito a: Modelo (1) – Programação linear

$$\sum_{i=1}^m v_i X_{iA} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j Y_{jK} - \sum_{i=1}^m v_i X_{iK} \leq 0, \quad k = 1, \dots, n$$

$$u_j, v_i \geq 0, \quad \forall j, i$$

onde: u_j - pesos dos *outputs*; v_i - pesos dos *inputs*; Y_{jK} - vetor de *outputs* da unidade A; X_{iK} - vetor de *inputs* da unidade A.

Quando o modelo é voltado para os *outputs*, a ênfase recai sobre a produção, ou seja, o objetivo é aumentar a quantidade de produtos ao máximo sem modificar a quantidade de matéria-prima.

3.3.1.4. Modelo DEA-CCR orientado a input

O Modelo CCR com orientação a *input* opera sob a suposição de retornos constantes de escala, o que significa que minimizando os insumos (*inputs*) busca-se maximizar os produtos (*outputs*).

$$\text{Min } w_A = \sum_{l=1}^r v_l X_{lA}$$

Sujeito a: (2)

$$\sum_{j=1}^s u_j X_{jA} = 1$$

$$\sum_{i=1}^r v_i X_{iK} - \sum_{j=1}^s u_j Y_{jk} \leq 0, \quad k = 1, \dots, n$$

$$u_j, v_i \geq 0, \quad \forall j, i$$

onde: u_j - pesos dos *outputs*; v_i - pesos dos *inputs*; Y_{jk} - vetor de *outputs* da unidade A; X_{iK} - vetor de *inputs* da unidade A.

3.3.1.5. BCC

O segundo modelo, conhecido como BCC, foi desenvolvido por Banker, Charnes e Cooper em 1984 e surgiu como uma forma de eficiência resultante da divisão do modelo CCR em dois componentes: eficiência técnica e eficiência de escala. Eles apresentaram um modelo de retornos de escala variáveis, o qual possibilita tanto retornos crescentes quanto decrescentes. No entanto, é importante notar que o modelo BCC possui um poder discriminatório menor do que o modelo CCR. Isso se verifica pelo fato das Unidades de Tomada de Decisão (DMUs) eficientes no modelo CCR serem eficientes no modelo BCC, mas o oposto não é necessariamente verdadeiro. Abaixo apresentaremos as duas orientações em que estão divididos os modelos DEA-BCC.

3.3.1.6. Modelo DEA-BCC orientado a output

$$\text{Max} \sum_{j=1}^s u_j Y_{jA} - u$$

Sujeito a: (3)

$$\sum_{j=1}^r v_i X_{iK} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j Y_{jK} - \sum_{i=1}^r v_i X_{iK} - u \leq 0, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, n$$

$$u_i \text{ e } v_i \geq 0 \quad \forall j, i$$

onde: u_j - pesos dos *outputs*; v_i - pesos dos *inputs*; Y_{jK} - vetor de *outputs* da unidade A; X_{iK} - vetor de *inputs* da unidade A.

3.3.1.7. Modelo DEA-BCC orientado a input

$$\text{Min } \sum_{i=1}^r v_i X_{iA} - u$$

Sujeito a: (4)

$$\sum_{i=1}^r u_i Y_{ik} = 1$$

$$\sum_{i=1}^r v_i X_{iK} - \sum_{j=1}^s u_j Y_{jK} - u \leq 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, n$$

$$u_j \text{ e } v_i \geq 0 \forall j, i$$

Onde, u_j - pesos dos *outputs*; v_i - pesos dos *inputs*; Y_{jK} - vetor de *outputs* da unidade A; X_{iK} - vetor de *inputs* da unidade A.

3.3.1.8. Eficiência de Escala

A eficiência de escala é determinada pela razão entre os índices de eficiência dos modelos CCR e BCC, considerando retornos constantes, crescentes ou decrescentes de escala (FERREIRA e GOMES, 2020).

$$EE = \frac{\theta_{CCR}}{\theta_{BCC}}$$

Com base na análise da Figura 7 apresentada abaixo, que ilustra uma situação envolvendo um insumo e um produto, e considerando um modelo orientado para *outputs*, podemos observar os limites eficientes calculados pelo modelo DEA. Isso é feito sob duas hipóteses: retorno constante à escala (CCR), ao qual pertence a DMU C, e retornos variáveis à escala (BCC), compostos pelas DMUs A, B, C, D e E. A última dessas DMUs é composta por duas partes, uma com retornos de escala não decrescentes (de A a C) e outra com retornos de escala não crescentes (de C a E). Importante notar que a DMU P não está incluída nessas fronteiras, o que a torna ineficiente. Na hipótese de retornos de escala constantes, a ineficiência técnica

por si só não permite identificar o tipo de retorno de escala que uma DMU está experimentando.

3.3.1.9. Variáveis Indesejáveis

Em certas situações na análise de eficiência, não podemos considerar todos os produtos ou resultados como desejáveis. Em determinados casos, o produto é a redução de um problema, ocorrendo o chamado “*output* indesejável”. Esse conceito é especialmente relevante em casos como, por exemplo, a redução do número de mortes em hospitais, redução no número de casos de dengue, redução no número de acidentes de trânsito e diminuição de crimes. Nesse contexto, a ênfase não está em maximizar a produção, mas sim em minimizá-la. (BRANCO, 2018)

Na literatura são encontradas cinco abordagens possíveis para lidar com fatores indesejáveis. A primeira opção é transferir a variável da saída para o lado de entrada do modelo, ou vice-versa (SOUZA, 2012). A segunda consiste em simplesmente ignorar os *inputs* e *outputs* indesejáveis. A terceira é tratar os *inputs* indesejáveis no modelo não linear DEA (FÄRE et al., 1989). A quarta opção envolve inverter o fator indesejável, ou seja, atribuir valores negativos aos fatores indesejáveis. No entanto, essa abordagem tem a desvantagem de perturbar a escala de intervalo dos dados originais e dos dados resultantes. A quinta opção consiste em subtrair o valor do fator indesejável do maior número inteiro maior que todas as saídas indesejáveis observadas (SOUZA, 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 Delineamento da Pesquisa

Quanto ao tipo, a pesquisa é caracterizada como descritiva, segundo Gil (2019, p. 26) “...as pesquisas deste tipo têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis”. O problema busca descrever a eficiência das empresas ferroviárias investigadas considerando os desempenhos operacionais.

No que diz respeito à natureza, o estudo é categorizado como quantitativo, fundamentando-se em dados secundários. A pesquisa quantitativa visa validar as

hipóteses por meio do uso de dados estruturados e estatísticos, analisando um grande número de casos representativos e recomendando um desfecho para a ação (MATTAR, 2001). Assim sendo, a natureza quantitativa justifica-se tendo como base as análises estatísticas feitas durante o estudo.

Por fim, segundo Gil (1999) o estudo é bibliográfico pois é uma pesquisa elaborada a partir de referências teóricas publicadas em livros, artigos científicos, relatórios dissertações de mestrado e teses de doutorado, com o intuito de fornecer contribuições científicas ao assunto focalizado.

4.2 Unidade de Análise

Atualmente no país, existem 16 ferrovias concedidas, mas as 12 DMUs definidas foram escolhidas para a realização da pesquisa por serem consideradas as mais importantes ferrovias nacionais, destacando-se em termos de tamanho da malha e, principalmente, pela produção, além da disponibilidade completa de dados. Os modelos CCR e BCC foram aplicados para análise dos resultados em uma série de variáveis de 2019 a 2022. A escolha ocorreu pois este período nos dá um bom embasamento sobre o comportamento e tendência dos fatos observados.

As concessionárias de transporte ferroviário analisadas são: Rumo Malha Norte (RMN), Rumo Malha Oeste (RMO), Rumo Malha Paulista (RMP), Rumo Malha Sul (RMS), Estrada de Ferro Carajás (EFC), Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), Ferrovia Centro Atlântica (FCA), Estrada de Ferro Paraná-Oeste - EFPO (Ferroeste), Ferrovia Tereza Cristina (FTC), MRS Logística S.A. (MRS), Ferrovia Transnordestina Logística S.A. (FTL) e Ferrovia Norte Sul Tramo Norte (FNSTN).

4.3 Coleta de Dados

Os dados utilizados no estudo (*inputs*, *outputs* e variáveis contextuais) provêm do banco de dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) responsável pela regulação e fiscalização dos transportes rodoviário, ferroviário e dutoviário no Brasil.

Foi realizado o tratamento da base de dados, para garantir a qualidade e a integridade dos dados. Isso envolveu a identificação e tratamento de dados faltantes, duplicados ou inconsistentes e a exclusão de operadores que não

continham todas as variáveis empregadas neste estudo, como a Ferrovia Norte Sul Tramo Central (FNSTC), FNS/FIOL, Transnordestina Logística S.A. e Ferrovia de Integração Oeste-Leste FIOL – Trecho 1. As unidades de medida foram padronizadas, e os formatos de datas foram verificados e ajustados, quando necessário.

4.4 Variáveis de Pesquisa

Os *inputs* selecionados foram: a quantidade de locomotivas, que refere-se ao número total de locomotivas disponíveis para operações de transporte, manobra e serviço; o número de trens formados; e a quantidade de vagões representando o número total de vagões disponíveis para o transporte de carga. Uma vez que cada um dos *inputs* selecionados podem ser fatores determinantes para gerar impacto nos resultados de desempenho das ferrovias.

Por outro lado, os *outputs* utilizados foram: a Tonelada Quilômetro Útil (TKU) que considera as cargas transportadas no referido ano, em toneladas, multiplicado pela sua respectiva distância útil percorrida; o Número de Acidentes que aconteceram em cada ano analisado, esta é uma variável indesejável pois é certo que a empresa responsável pela malha deseja reduzir este número ao máximo. É importante ressaltar que os dados consideraram apenas o transporte de cargas, não levando em consideração o transporte de passageiros. Também foram consideradas apenas as locomotivas em uso, excluindo-se as demais locomotivas em manutenção.

Quadro 1 - Combinações de Insumos e Produtos com Rendimentos
Constantes e Variáveis de Escala

<i>Input</i>	
Número	Fonte de dados secundários e forma de cálculo das variáveis
<i>Input 1</i>	Quantidade de locomotivas
<i>Input 2</i>	Número de trens formados
<i>Input 3</i>	Quantidade de vagões
<i>Output</i>	
Número	Fonte de dados secundários e forma de cálculo das variáveis
<i>Output 1</i>	Tonelada Quilômetro Útil
<i>Output 2</i>	Número de Acidentes (Indesejável)

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4.5 Análise de Dados

Para alcançar os objetivos pretendidos, foi feita uma abordagem quantitativa utilizando o modelo DEA (Análise Envoltória de Dados), por meio do qual foi possível construir um ranking de eficiência das concessionárias brasileiras de transporte ferroviário. Para a análise dos resultados foi aplicado o modelos BCC e CCR com orientação *output* e a eficiência de escala. Por fim, o pacote *pyDEA* foi empregado para calcular os escores de eficiência para os modelos clássicos DEA (Ver Anexo Apêndice A).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Análise Descritiva dos Dados

Na análise de dados conduzida neste estudo, utilizamos a Estatística Descritiva para examinar os valores máximos, mínimos, média, mediana, outliers, correlação e desvio-padrão desse conjunto de indicadores. Os dados empregados no modelo DEA referem-se ao período de 2019 a 2022 e envolveram 3 *inputs* e 2 *outputs*. Como *inputs* foram selecionadas as variáveis: quantidade de locomotivas, o número de trens formados e a quantidade de vagões. E os *outputs*: a Tonelada

Quilômetro Útil e o Número de Acidentes (este último sendo um output indesejável) Ver página 41, item 3.3.1.9.

Os insumos e produtos selecionados são aqueles utilizados pelo órgão regulador do setor (ANTT) para controlar o desempenho das concessionárias ferroviárias.

O número de DMUs deve ser maior que triplo da soma do número de *inputs* mais o número de *outputs*. Para conferir maior poder discriminatório entre as eficiências encontradas nos modelos DEA, cada combinação ferrovia-ano foi considerada como uma DMU para um total de 45 DMUs. Esta abordagem tem sido usada por pesquisadores . Um exemplo dessa abordagem pode ser encontrado no estudo desenvolvido por Santos (2011). O autor aplicou a metodologia DEA para avaliar a eficiência produtiva das ferrovias de carga brasileiras, baseando-se nos dados coletados pela ANTT no período de 2006 a 2009.

Com base nas cinco variáveis observadas na Tabela 3, fica evidente que a ampla dispersão de dados reflete as possíveis diferenças das escalas de operação das ferrovias brasileiras.

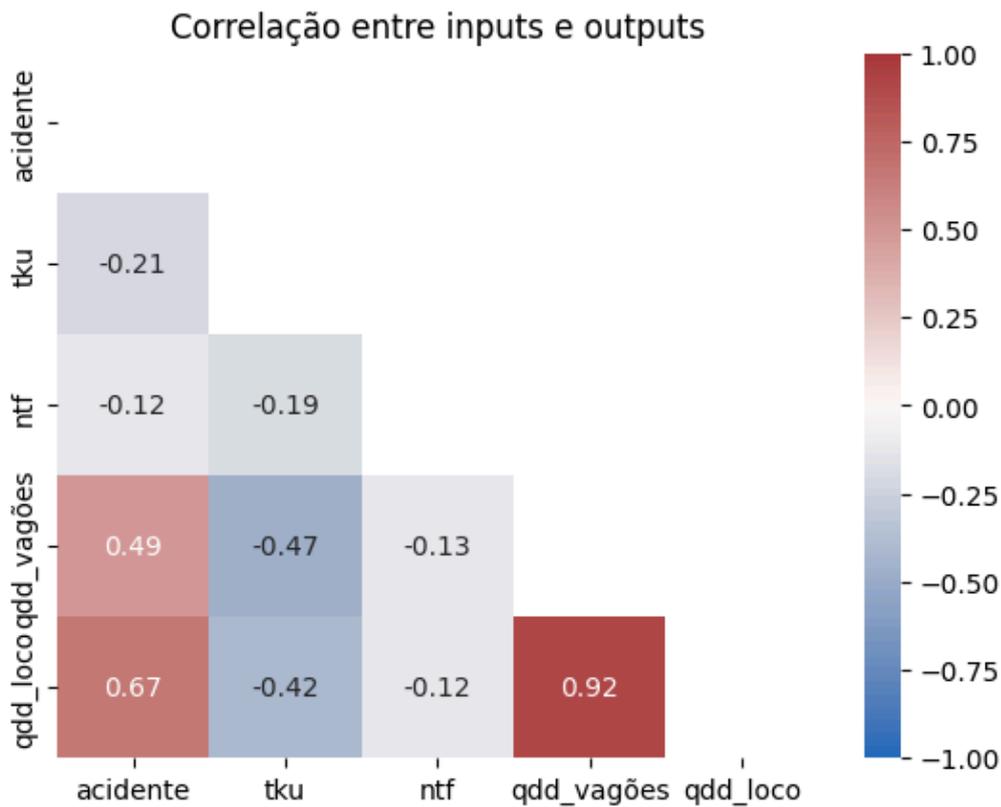
Tabela 3 - Estatística Descritiva dos *Inputs* e *Output*

	<i>Input 1</i>	<i>Input 1</i>	<i>Input 1</i>	<i>Output 1</i>	<i>Output 2</i>
	Quantidade de locomotivas (qdd_loco)	Número de trens formados (ntf)	Quantidade de vagões (qdd_vagões)	Tonelada Quilômetro Útil (TKU)	Acidentes
Mínimo	6	1451	80	6	1
Mediana	54	12810	3568	51	20
Média	132	44	4973	167	59
Máximo	710	469	24989	820	276
Desvio Padrão	172	98	5987	219	73
DMUs = 45					

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para avaliar a possibilidade de reduzir o número de variáveis consideradas na análise, foram examinados os coeficientes de correlação entre os *inputs* e *outputs* do modelo. A Figura 8 apresenta os resultados dessa análise entre as variáveis.

Figura 8 - Coeficientes de correlação



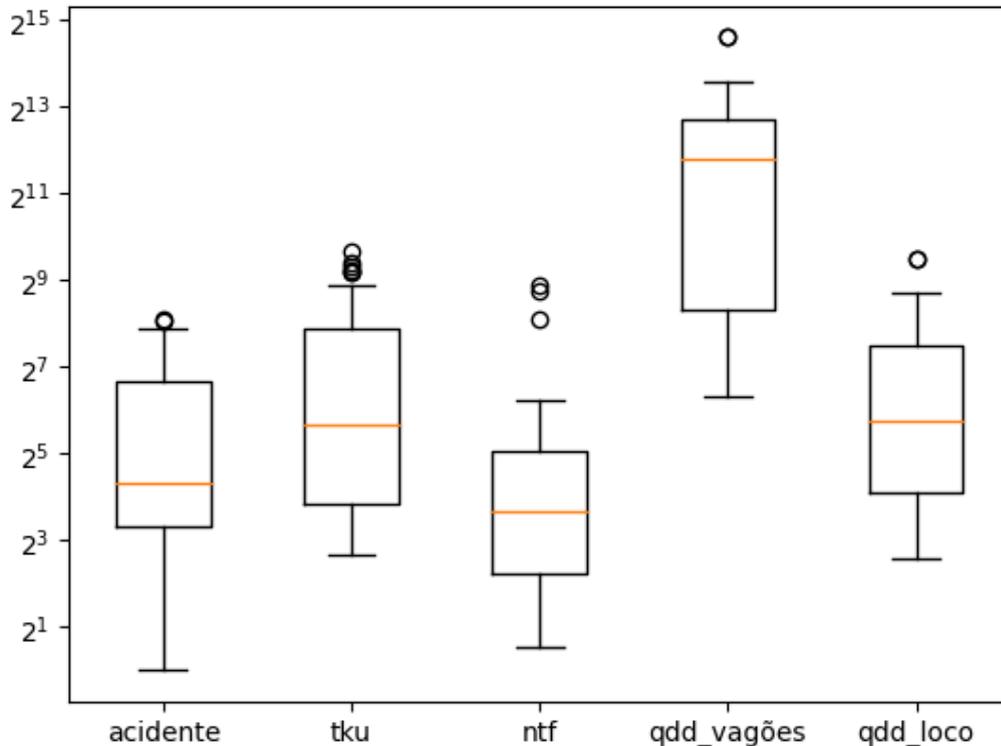
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Alguns coeficientes de correlação entre os pares de *inputs* são elevados. No entanto, todas as variáveis foram mantidas no estudo, pois são essenciais para a análise e não comprometem a validade e a precisão do modelo.

Observando a figura 9, podemos perceber a existência de *outliers* nas variáveis número de trens formados (ntf), quantidade de vagões (qdd_vagões), quantidade de locomotivas (qdd_loco) e tonelada quilômetro útil (tku). No entanto, os *outliers* foram mantidos, dado que o modelo DEA é não paramétrico e permite outras formas de distribuição além da normal. Além disso, a remoção dos outliers poderia diminuir a capacidade discriminatória do modelo.

Figura 9 - Boxplot dos *inputs* e *outputs* utilizados

Boxplots dos inputs e outputs



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.2 Análise dos Modelos de Eficiência

A análise dos modelos de eficiência DEA CCR e DEA BCC aos dados selecionados são apresentados abaixo (Tabela 4). Os modelos foram orientados ao *output* considerando que os ativos operacionais das ferrovias não são de liquidez imediata, o que torna desafiadora a tomada de decisões no curto prazo para aumentar a eficiência. Assume-se, portanto, que as ferrovias buscam maximizar os *outputs* dado os *inputs*.

A Tabela 4 apresenta a eficiência técnica com retornos constantes de escala (CCR), eficiência técnica com retornos variáveis de escala (BCC), tipo de escala de retorno (RTS).

Tabela 4 - Escores de Eficiência dos Modelos DEA CCR e DEA BCC

	DMU	CCR	BCC	RTS	Tipo
1	RMN_2019	0.040	0.163	0.244	decrésciente
2	RMN_2020	0.040	0.160	0.248	decrésciente
3	RMN_2022	0.049	0.145	0.338	crecente
4	RMO_2019	0.018	0.138	0.132	decrésciente
5	RMO_2020	0.005	0.051	0.095	decrésciente
6	RMO_2021	0.010	0.083	0.114	decrésciente
7	RMO_2022	0.007	0.074	0.095	decrésciente
8	RMP_2019	0.407	1000	0.407	decrésciente
9	RMP_2020	0.419	0.842	0.497	decrésciente
10	RMP_2021	0.892	0.892	1000	constante
11	RMP_2022	1000	1000	1000	constante
12	RMS_2019	1000	1000	1000	constante
13	RMS_2020	1000	1000	1000	constante
14	RMS_2021	0.913	0.954	0.957	decrésciente
15	RMS_2022	1000	1000	1000	constante
16	EFC_2019	0.032	0.075	0.430	decrésciente
17	EFC_2020	0.032	0.072	0.449	decrésciente
18	EFC_2021	0.032	0.069	0.466	decrésciente
19	EFC_2022	0.033	0.071	0.459	decrésciente
20	EFVM_2019	0.271	0.272	0.997	decrésciente
21	EFVM_2020	0.207	0.231	0.893	decrésciente
22	EFVM_2021	0.258	0.260	0.992	decrésciente
23	EFVM_2022	0.253	0.255	0.990	decrésciente
24	FCA_2019	0.687	0.767	0.897	decrésciente
25	FCA_2020	0.678	0.764	0.888	decrésciente
26	EFPO_2019	0.002	0.027	0.057	crecente
27	EFPO_2020	0.592	1000	0.592	crecente
28	EFPO_2021	1000	1000	1000	constante
29	EFPO_2022	0.960	1000	0.960	crecente
30	FTC_2019	0.022	0.056	0.383	decrésciente
31	FTC_2020	0.022	0.048	0.449	crecente
32	FTC_2021	0.016	0.051	0.325	decrésciente
33	FTC_2022	0.012	0.046	0.272	crecente
34	MRS_2019	0.782	1000	0.782	decrésciente
35	MRS_2020	0.813	0.937	0.867	decrésciente
36	MRS_2021	0.985	1000	0.985	decrésciente
37	MRS_2022	0.843	0.930	0.907	decrésciente
38	FTL_2019	0.009	0.141	0.063	decrésciente
39	FTL_2020	0.013	0.192	0.069	decrésciente
40	FTL_2021	0.027	0.377	0.071	decrésciente
41	FTL_2022	0.018	0.268	0.066	decrésciente
42	FNSTN_2019	0.095	0.709	0.134	crecente
43	FNSTN_2020	0.092	0.657	0.140	crecente
44	FNSTN_2021	0.073	0.592	0.124	crecente
45	FNSTN_2022	0.064	0.495	0.130	crecente

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Primeiramente, é possível identificar que, no modelo CCR, apenas 5 DMUs atingiram a máxima eficiência técnica (1.000), sendo elas, as ferrovias Rumo Malha Sul (RMS) nos anos de 2019, 2020, e 2022, Rumo Malha Paulista (RMP) no ano de 2022 e Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) em 2021. Isso indica que essas DMUs utilizam seus recursos de forma ideal, operando na fronteira de eficiência. Por outro lado, DMUs como Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) EM 2019 e Rumo Malha Oeste (RMO) em 2020 apresentaram eficiências muito baixas, o que sugere a necessidade de melhorias significativas na gestão de seus recursos.

A eficiência operacional no modelo CCR variou de 0.002 a 1.000, demonstrando uma ampla disparidade entre as DMUs. Essa variação significa que os DMUs menos eficientes têm grande potencial para aumentar seu volume de movimentação de cargas e reduzir acidentes sem alterar seus insumos. As DMUs que alcançaram a máxima eficiência podem servir como *benchmarks* para as demais, ajudando na melhoria da eficiência geral

No modelo BCC, observa-se que 10 DMUs atingem a eficiência máxima de 1.000, incluindo Rumo Malha Paulista (RMP) em 2019 e 2022; Rumo Malha Sul (RMS) em 2019, 2020 e 2022, Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) nos anos de 2020, 2021 e 2022; e MRS Logística S.A. (MRS) em 2019 e 2021. Isso reflete que, ao considerar retornos variáveis de escala, mais DMUs são eficientes, indicando que algumas ineficiências observadas no modelo CCR são devido a problemas de escala e não de gestão de recursos.

Além disso, uma razão igual a 1 indica operação na escala ótima. Quando essa razão é menor que 1, a DMU está operando abaixo da escala ótima, apresentando ineficiência técnica. A medida de eficiência de escala, obtida pela razão entre as eficiências nos modelos CCR e BCC, permite identificar se as DMUs operam em uma escala ótima. Para diferenciar se essas ineficiências são devido a retornos crescentes ou decrescentes de escala, analisa-se a DMU sob a restrição de retornos não crescentes. Se a eficiência neste modelo igualar a do modelo BCC, a DMU opera acima da escala ótima, em retornos decrescentes; caso contrário, opera em retornos crescentes.

5.3 Eficiência de Escala

Depois da classificação das ferrovias segundo os critérios de eficiência e escala, podem-se realizar algumas recomendações gerais, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação da DMU segundo a eficiência de escala

Tipo de retorno (RTS)	Condição da DMU segundo a pura eficiência técnica	
	Eficiente	Ineficiente
Constante	<p>Total: 5 DMUs (11,12,13,15,28)</p> <p>Esta é a melhor atuação. A DMU utiliza os recursos sem desperdício e opera em escala ótima. O aumento da produção deve ocorrer mantendo-se a proporção de uso dos fatores. Os aumentos de custos são proporcionais aos aumentos de produção.</p>	<p>Total: 1 DMU (10)</p> <p>Apesar de estar operando na escala ótima, existe ineficiência técnica. Isso significa que se pode reduzir o uso dos insumos e continuar produzindo a mesma quantidade (orientação insumo). De maneira equivalente, a produção pode crescer utilizando-se os mesmos insumos (orientação produto). Ao eliminar as ineficiências técnicas, a DMU torna-se eficiente com retornos constantes.</p>
Crescente	<p>Total: 0 DMU</p> <p>Apesar de tecnicamente eficiente, não existindo insumos utilizados em excesso, o volume de produção está abaixo da escala ótima. Isso significa que as DMUs podem aumentar a produção a custos decrescentes. Nesse sentido, o aumento da produção deve ocorrer mediante incorporação de insumos, porém mantendo-se as relações entre as quantidades de produto e insumos.</p>	<p>Total: 10 DMUs (3,26,27,29,31,33,42,43,44,45)</p> <p>As Unidades de Decisão (DMUs) apresentam ineficiências técnicas devido ao uso excessivo de insumos e ineficiências de escala, pois operam abaixo da escala ótima. Para melhorar a eficiência técnica, é necessário eliminar os excessos no uso de insumos. Já para operar na escala ótima, é essencial aumentar a produção. Esse aumento de produção deve ocorrer por meio da redução das relações entre as quantidades de insumos utilizados e o volume de produção.</p>
Decrescente	<p>Total: 0 DMU</p> <p>DMU tecnicamente eficiente, porém operando acima da escala ótima. Mantendo-se essa situação, o aumento da produção se dará a custos crescentes. Pode-se reduzir o tamanho da produção das DMUs, utilizando mais unidades, porém menores e mantendo a mesma proporção entre inputs e outputs. Também pode-se otimizar a produção com adoção de políticas qualitativas, ou seja, o aumento da produtividade dos fatores possibilitaria o crescimento da produção sem a necessidade de se utilizar mais insumos</p>	<p>Total: 29 DMUs (1,2,4,5,6,7,8,9,14,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,30,32,34,35,36,37,38,39,40,41)</p> <p>Nesta situação, as DMUs estão operando acima da escala ótima e apresentam ineficiência técnica. É preciso corrigir os dois problemas. Para aumentar a eficiência técnica, deve-se eliminar os insumos que estão sendo utilizados em excesso, o que equivale a produzir mais utilizando os mesmos insumos. Com relação ao problema de escala, pode-se simplesmente reduzir a produção em cada DMU, utilizando um número maior de DMUs menores para produzir a mesma quantidade anterior.</p>

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Mediante a isso, podemos afirmar que as ferrovias que operam em escala ótima e utilizam os recursos sem desperdício são Rumo Malha Sul nos anos de 2019, 2020 e 2022, Rumo Malha Paulista no ano de 2019 e Estrada de Ferro Paraná-Oeste em 2021. Dessa forma, o aumento da produção deve ocorrer mantendo-se a proporção de uso dos fatores e os aumentos de custos são proporcionais aos aumentos de produção.

A Ferrovia Norte-Sul Tramo Norte (FNSTN) nos anos de 2019 a 2022, Ferrovia Tereza Cristina (FTC) nos anos de 2020 e 2022, a Rumo Malha Norte em 2022 e a Estrada de Ferro Paraná Oeste nos anos de 2019, 2020 e 2022, apresentam ineficiência técnica, caracterizada pelo uso excessivo de insumos, e ineficiência de escala, operando abaixo da escala ótima. Para aumentar a eficiência técnica, é preciso eliminar o excesso de insumos. Além disso, para atingir a escala ótima, é necessário aumentar o volume de produção. Resumidamente, as ferrovias devem aumentar a produção, mas eliminando os excessos.

As ferrovias Rumo Malha Norte (2019-2020), Rumo Malha Oeste (2019 a 2022), Rumo Malha Paulista (2019-2020), Rumo Malha Sul (2021), Estrada de Ferro Carajás (2019 a 2022), Estrada de Ferro Vitória a Minas (2019 a 2022), Ferrovia Centro Atlântica (2019-2020), Ferrovia Tereza Cristina (2019, 2021), MRS Logística S.A. (2019 a 2022) e Ferrovia Transnordestina Logística S.A. (2019 a 2022) estão operando acima da escala ótima e apresentam ineficiência técnica. É necessário corrigir ambos os problemas. Para aumentar a eficiência técnica, deve-se eliminar o excesso de insumos, permitindo produzir mais com os mesmos recursos. Além disso, seria importante considerar investimentos na expansão da capacidade operacional por meio de avanços tecnológicos, aumentando assim a produtividade.

A Rumo Malha Paulista (2021) apesar de operar em ótima escala, a DMU ainda apresenta ineficiência técnica, o que indica que é possível reduzir o uso dos insumos mantendo a mesma quantidade de produção. Da mesma forma, é viável aumentar a produção utilizando os mesmos insumos (orientação produto). Ao corrigir essas ineficiências técnicas, a DMU se torna eficiente com retornos constantes.

A tabela 6 mostra uma ampla variação na eficiência das DMUs avaliadas nos modelos DEA CCR, DEA BCC e SE. Com base nos resultados apresentados na tabela, é evidente que algumas unidades operacionais estão operando com alta eficiência, enquanto outras estão significativamente abaixo desse padrão.

Tabela 6 - Estatística Descritiva dos escores DEA CCR, DEA BCC e SE

	DEA CCR	DEA BCC	SE
Média	0,349	0,486	0,533
Desvio Padrão	0,397	0,396	0,371
Mínimo	0,002	0,027	0,057
25%	0,022	0,083	0,134
50%	0,092	0,272	0,449
75%	0,782	0,937	0,957
Máximo	1	1	1
% de ineficiência	0,651	0,514	0,4675

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A eficiência média calculada para o modelo CCR é de 0,349, indicando uma ineficiência geral de aproximadamente 65,1%. No modelo BCC, a eficiência média é um pouco maior, atingindo 0,486, o que ainda reflete uma ineficiência consideravelmente alta de cerca de 51,4%. O modelo SE revela uma eficiência média de 0,533, indicando uma ineficiência geral de aproximadamente 46,7%. Esses números destacam que há espaço significativo para melhorias em todos os modelos analisados.

Além disso, a análise das estatísticas descritivas revela que a ineficiência varia consideravelmente entre as DMUs, com valores mínimos próximos de zero e máximos atingindo a eficiência máxima de 1. Essa disparidade indica a necessidade de identificar e entender as práticas eficientes em algumas unidades e aplicá-las em outras para melhorar o desempenho geral do sistema ferroviário.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do transporte de cargas das ferrovias no Brasil por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA). A pesquisa

buscou descrever o setor ferroviário nacional e mensurar a eficiência produtiva das ferrovias de carga, utilizando modelos DEA com orientações para *output* e *input* e avaliando a eficiência de escala. A análise revelou que, apesar da grande variação na eficiência entre as diferentes ferrovias, existem oportunidades significativas para melhorias na gestão dos recursos e na operação das ferrovias.

O estudo revelou que, no modelo DEA CCR, apenas 11% das DMUs alcançaram a eficiência máxima. As DMUs eficientes neste modelo foram: as ferrovias Rumo Malha Sul (RMS) nos anos de 2019, 2020, e 2022, Rumo Malha Paulista (RMP) no ano de 2022 e Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) em 2021. No modelo DEA BCC, uma porcentagem maior de DMUs atinge a eficiência máxima, cerca de 22%, sugerindo que a escala de operação é um fator relevante na eficiência observada. As DMUs eficientes no modelo BCC foram: Rumo Malha Paulista (RMP) em 2019 e 2022; Rumo Malha Sul (RMS) em 2019, 2020 e 2022, Estrada de Ferro Paraná Oeste (EFPO) nos anos de 2020, 2021 e 2022; e MRS Logística S.A. (MRS) em 2019 e 2021. Em ambos os modelos, as DMUs eficientes foram aquelas que conseguiram produzir a quantidade máxima de produtos sem alterar a quantidade de matéria-prima utilizada. Além disso, as ferrovias eficientes transportam, em sua maioria, *commodities* como milho, açúcar, soja, trigo e óleo vegetal.

Do ponto de vista gerencial, os resultados deste estudo podem ajudar os gestores das ferrovias concedidas a identificar áreas críticas para melhoria. Ferrovias que operam abaixo da escala ótima e apresentam ineficiências técnicas devem considerar a revisão de suas estratégias operacionais e investimentos em tecnologias que possibilitem aumentar a produtividade e reduzir custos. Além disso, as ferrovias que já operam de forma eficiente podem servir como *benchmarks* para as demais, fornecendo exemplos de boas práticas que podem ser adaptadas e implementadas para melhorar a eficiência em outras unidades.

Como limitação ao estudo, destaca-se as poucas referências nacionais sobre a eficiência do sistema ferroviário brasileiro. Além disso, o estudo se baseia em dados e não leva em conta variáveis contextuais e ambientais específicas que poderiam influenciar a eficiência operacional das ferrovias.

Para futuras pesquisas, seria interessante incluir ferrovias de outros países, permitindo uma comparação internacional que poderia enriquecer os resultados. Além disso, considerar a inclusão de variáveis contextuais como os impactos das

políticas públicas e investimentos governamentais na eficiência do transporte ferroviário de cargas, oferecendo uma visão mais abrangente do setor. Estudos adicionais poderiam também investigar as práticas específicas que contribuem para a eficiência das ferrovias mais bem classificadas, possibilitando uma compreensão mais profunda dos fatores que impactam a performance no setor ferroviário.

REFERÊNCIAS

- ANTT propõe novos rumos ao setor de ferrovias para 2023. **Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/antt-propoe-novos-rumos-ao-setor-de-ferrovias-para-2023>>. Acesso em: 9 out. 2023.
- Declaração de Rede**. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/declaracao-de-rede>>. Acesso em: 23 set. 2024.
- BOITEUX, P. **História das Ferrovias Brasileiras**. [s.l.]: Letra Capital Editora LTDA, 2014.
- BRANCO, C. S. C. Análise Envoltória de Dados em Auditoria. **Revista do TCU**, 2018.
- BRUSTOLIN, F. J. **Transporte ferroviário**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/presenca/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=18>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- BURI, M. R.; FABRETI, M. P.; DE OLIVEIRA, E. R.; DA SILVA, M. M. (2006). **Transporte ferroviário de cargas no Brasil – Aproveitamento da malha**. Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção – 13a SIMPEP, Bauru – São Paulo, Brasil, Novembro.
- CALDAS, M. A. F. et al. **A eficiência do transporte ferroviário de cargas: uma análise do Brasil e dos Estados Unidos**. In: CONGRESO LATINO-IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 16., 2012, Rio de Janeiro; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 44., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CLAIO; SBPO, 2012.
- CANTOS, P. ; MANUEL PASTOR, J; SERRANO, L. **Evaluating Ownership, organizational changes and performance**. In: CLARKE, T.;PITELIS, C. (editores). The political economy of privatization. Transport Policy, v. 24, p. 67–72, 2012.
- CLARKE, T.;PITELIS, C. **The political economy of privatization**. Routledge, Londres, 2005, pp.31-53.
- Concessões Ferroviárias**. Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT. Disponível em: <<https://antt-hml.antt.gov.br/concessoes-ferroviarias>>. Acesso em: 9 out. 2023.
- DE CASTRO, J. et al. **Avaliação de eficiência das ferrovias brasileiras: uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e Representação Gráfica Bidimensional**. Revista Espacios, v. 38, n. 14, p. 16, 2017.
- DE PAULA, D. A. **As ferrovias no Brasil: análise do processo de erradicação de ramais**. Actas del II Congreso de Ferrocarriles, 2000.

DORES, C.C.C.; VIANA, G.V.R.; THOMAZ, A.C.F. **Análise de Eficiência das Policlínicas do Estado do Ceará utilizando Análise Envoltória de Dados com Ponderação de Resultados**. 67 In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. XLVIII, Vitória, ES. p. 2699-2707, 2016.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C. A. .; PASURKA, C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. **The review of economics and statistics**, p. 90–98, 1989.

FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. **Introdução à análise envoltória de dados**. 2. ed. Viçosa: ED UFV, 2020. p. 392.

FERREIRA, C.M.C., GOMES, A.P. **Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações**. Viçosa: Editora UFV, 2009. 389 p.

FILHO, J. K. D.M. **Mensuração de Eficiência Produtiva das Ferrovias Brasileiras de Carga: Uma Aplicação de Modelos DEA e Tobit**. Mestrado em Transportes. UnB. Brasília. 2014.

FONTAN, R; ROSA, R; LACRUZ, A. **Eficiência das ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro e pelotas**. [s.l.]: FapUNIFESP (SciELO), 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/scielopreprints.1941>>. Acesso em: 2 Oct. 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019. p. 230.

GUERRA NETO, P.P. Evolução dos contratos das concessões de ferrovias. **Coletânea de Pós-Graduação**, v. 4, n. 18, 2019.

GUERREIRO, A. S. **Análise da Eficiência de Empresas de Comércio Eletrônico usando Técnicas da Análise Envoltória de Dados**. 2006. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC- Rio, RJ, 2007.

Histórico. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/historico>>. Acesso em: 10 out. 2023.

Informações gerais. ANTF. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>. Acesso em: 9 Oct. 2023.

iNFRA Debate: O segmento de shortlines de carga ferroviária – Experiências norte-americanas e perspectivas no Brasil – Agência iNFRA. Disponível em: <<https://www.agenciainfra.com/blog/infradebate-o-segmento-de-shortlines-de-carga-ferroviaria-experiencias-norte-americanas-e-perspectivas-no-brasil/>>. Acesso em: 11 Oct. 2023.

KUTLAR, A; KABASAKAL, A; SARIKAYA, M. Determination of the efficiency of the world railway companies by method of DEA and comparison of their efficiency by Tobit analysis. **Quality & Quantity**, v. 47, n. 6, p. 3575–3602, 2012.

LANZA, J.F.R. **Ferrovias, mercado e políticas públicas: As shortlines como solução para o transporte ferroviário no Brasil.** [s.l.]: Editora Labrador, 2020.

MATTAR, F. N. Pesquisa de marketing. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MATTOS, O.N.DE. **Café e ferrovias: a evolução ferroviária de São Paulo e o desenvolvimento da cultura cafeeira.** Campinas, SP: Pontes, 1994.

MELLO, J.C.C.B.S.; MEZA, L.A.; GOMES, E.G.; SERAPIÃO, B.P.; LINS, M.P.E. **Análise Envoltória dos Dados no estudo da Eficiência e dos benchmarks para as companhias aéreas brasileiras.** Pesqui. Oper., Rio de Janeiro, vol. 23, Ago. 2003

MORESI, E *et al.* Metodologia da pesquisa. Brasília: Universidade Católica de Brasília, v. 108, n. 24, p. 5, 2003.

Nosso Território. IBGE Educa. Disponível em:

<<https://educa.ibge.gov.br/criancas/brasil/nosso-territorio/19638-o-brasil-no-mundo.html>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

ODILON, N DE M.. **Café e ferrovias: a evolução ferroviária de São Paulo.** Campinas, SP: Pontes, 1990.

SANTOS, M. S. (2011). **Avaliação da eficiência produtiva das ferrovias de carga no Brasil: uma aplicação da metodologia DEA.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 78 fl.

SHOPPA, R. F. (2011). **150 anos do trem no Brasil.** Rio de Janeiro: Votorantim. 196 p.

SILVA, F. G. F. DA.; Macambira, J. K.; Rocha, C. H. **Medindo a eficiência produtiva do transporte por ferrovias brasileiras : uma aplicação dos modelos DEA e Tobit.** [s.l.]: IPEA, 2019.

SILVEIRA, M. R. **Estradas de Ferro no Brasil: das primeiras construções às Parcerias Público-Privadas.** Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

SILVEIRA, M. R. **A importância econômica das ferrovias para o Brasil.** Revista dos Transportes Públicos - ANTP. São Paulo, v. 24, nº 95, 2002a, p. 55-70.

SOUZA, M. G. Z. N. DE. **Avaliação da eficiência energética usando análise envoltória de dados: Aplicação aos países em desenvolvimento.** [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2012.

APÊNDICE A - Código Python

🔗 Cópia de script_TCC_Paola.ipynb