

MEDINDO A EFICIÊNCIA PRODUTIVA DO TRANSPORTE POR FERROVIAS BRASILEIRAS: UMA APLICAÇÃO DOS MODELOS DEA E TOBIT

Francisco Gildemir Ferreira da Silva¹

José Kleber Macambira²

Carlos Henrique Rocha³

Este estudo mede a eficiência produtiva das ferrovias de carga brasileiras por meio da aplicação de modelos DEA (data envelopment analysis), considerando retornos constantes de escala e retornos variáveis de escala. Dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) foram utilizados por possuírem atualização mensal. O período de estudo desta pesquisa é de janeiro de 2006 a dezembro de 2011. Doze concessionárias de transporte ferroviário foram consideradas nesta análise. Primeiro, foram selecionadas variáveis proxies que representam os fatores de produção utilizados pelas concessionárias ferroviárias na produção de transporte. Essas variáveis foram utilizadas como insumos para a produção e o transporte, e produção de modelos DEA. Após a aplicação dos modelos DEA, foram obtidos os ganhos de eficiência produtiva. Com o modelo Tobit, modelos de regressão foram preparados para avaliar o nível de correlação entre os inputs dos modelos DEA e das eficiências produtivas. Os resultados dos modelos DEA mostram que as estradas de ferro que se especializam no transporte de minerais e commodities agrícolas têm níveis mais elevados de eficiência produtiva do que as ferrovias que operam no transporte de um portfólio mais diversificado de produtos. Por sua vez, os modelos de regressão Tobit mostram que todas as variáveis usadas como insumos na modelagem DEA têm correlação significativa com a eficiência produtiva. Desse modo, analisar os significados de correlações pode-se inferir que o pessoal e a gestão operacional são questões significativas no desempenho do frete brasileiro nas ferrovias.

Palavras-chave: modelos truncados e censurados; modelos de regressão de limiar; produção; produtividade multifatorial; ferrovias.

MEASURING THE PRODUCTIVE EFFICIENCY OF BRAZILIAN RAILWAYS TRANSPORT: AN APPLICATION OF DEA AND TOBIT MODELS

This study measures the productive efficiency of Brazilian freight railways by the application of DEA (Data Envelopment Analysis) models considering constant returns to scale and variable returns to scale returns. Data from the National Transportation Agency was used because it has a monthly actualization. The study period is among the months from January 2006 to December 2011 and the 12 dealerships of railway transportation were considered for this study. First, proxy variables representing the factors of production used by railway concessionaires in the production of transport were selected. These variables were used as inputs to production and transport as output of DEA models. After application of DEA models and obtaining the productive efficiencies, Tobit censored regression models were prepared to assess the level of correlation between inputs

1. Coordenação do Programa de Pós-Graduação em economia da Universidade Federal do Ceará (Caen/UFC). E-mail: <gildemir@gmail.com>.

2. Mestre em transportes pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail: <josekleber.pjl@gmail.com>.

3. Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT) da UnB. E-mail: <chrocha@unb.br>.

of the DEA models and productive efficiencies. The results of DEA models show that the railroads that specialize in the transportation of minerals and agricultural commodities have higher levels of productive efficiency than the railroads that operate in the transport of a more diversified portfolio of products. On the other hand, the Tobit regression models show that all variables used as inputs in modeling DEA, have significant correlation with productive efficiencies, and analyzing the meanings of correlations can be inferred that the personnel and operational management are significant issues in performance of Brazilian freight railways.

Keywords: truncated and censored models; threshold regression models; production; multifactor productivity; railroads transportation.

JEL: C24; D24; L92.

1 INTRODUÇÃO

Entre 1996 e 1998 foram concedidos 28.614 km de ferrovias à iniciativa privada. Atualmente, a gestão e operação dessa malha são realizadas por doze concessões que atuam em diferentes mercados e regiões. A expectativa do Estado com a privatização do setor ferroviário era a de aumento da participação desse setor na matriz de transporte de carga brasileira, com o aumento da eficiência produtiva ocasionado por investimentos que seriam realizados pelas concessionárias. Porém, o que se observou foi uma especialização por parte das concessões no atendimento a dois segmentos específicos do mercado, minério de ferro e grãos agrícolas (soja e milho). Esse arranjo fez com que o Estado iniciasse uma série de reformas no setor ferroviário com o objetivo de aumentar sua eficiência com a desmonopolização do setor e a criação de condições para um sistema ferroviário mais aberto e mais competitivo. Os estudos de eficiência do setor ferroviário indicam um significativo nível de ineficiência do sistema e um efeito positivo é observado com as reformas (Pavlyuk, 2008; Coelli e Perelman, 2000; Friebel, Ivaldi e Vibes, 2005; Asmild *et al.*, 2008; Wetzel, 2008; Silva *et al.* 2010). Apesar do número significativo de estudos internacionais nessa área, não há qualquer uniformidade na compreensão dos resultados de funcionamento do sistema de transporte ferroviário, considerando parâmetros relacionados à eficiência, como o emprego do material rodante, consumo de combustível e emprego de mão de obra.

Objetivando analisar a eficiência produtiva do sistema ferroviário brasileiro de carga, que é composto por doze concessionárias, durante o período de 2006 a 2011, este trabalho determina parâmetros que influenciam a eficiência produtiva do sistema ferroviário brasileiro de carga, utilizando modelos não paramétricos de análise de eficiência, aferindo o nível de correlação entre *inputs* dos modelos não paramétricos e a eficiência produtiva do sistema ferroviário brasileiro de carga parametricamente.

Para consecução do proposto, este artigo está estruturado em cinco tópicos, incluindo essa introdução. O tópico dois apresenta um histórico sobre as ferrovias brasileiras desde o período do Império até o processo de elaboração do novo marco

regulatório para implantação do modelo ferroviário *open access* no Brasil. O terceiro tópico apresenta os conceitos de produtividade e eficiência, e descreve as técnicas não paramétricas e paramétricas de análise de eficiência utilizadas na mensuração de eficiência produtiva das concessões ferroviárias brasileiras. No quarto tópico, faz-se uma descrição dos indicadores do setor, desenvolve-se a metodologia e os modelos para estudar a eficiência das concessões ferroviárias brasileiras, expondo os resultados encontrados. O último tópico conclui o estudo.

2 ASPECTOS HISTÓRICOS DAS FERROVIAS BRASILEIRAS

No Brasil, o modal ferroviário ocupou lugar de destaque no transporte de cargas, tendo o seu desenvolvimento favorecido pela hegemonia da tecnologia ferroviária de transportes no mundo, a expansão da produção de café e os incentivos governamentais para a construção de ferrovias (Buri *et al.*, 2006). Tal quadro se reverteu com a deflagração da Primeira Guerra Mundial, implicando uma desaceleração das obras ferroviárias por falta de recursos financeiros. Com isso, em 1958, a rede ferroviária brasileira atingia a marca recorde de 37.967 km em tráfego; enquanto a malha americana, de mesmo período de construção, representava quase dez vezes esse valor. Além disso, a partir daquele ano, a malha de ferrovias começou a encolher, com a erradicação de linhas e ramais antieconômicos, sendo catalisada na década de 1950. Com os grandes volumes de investimentos direcionados à construção e pavimentação de rodovias, as ferrovias começaram a perder importância no transporte brasileiro (Buri *et al.*, 2006).

Tavares (2003) indica que, durante a década de 1980 e início da década de 1990, o governo federal realizou vultosos aportes na Rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA), que contribuíram significativamente para o enorme *deficit* público, obrigando o governo a repensar a gestão do setor ferroviário brasileiro. Em 1992, a RFFSA foi incluída no Programa Nacional de Desestatização (PND), criando a expectativa de superar um dos principais gargalos ao crescimento econômico do país, a infraestrutura de transportes, pois objetivava transferir a gestão do setor ferroviário à iniciativa privada, almejando que esta realizasse investimentos para reverter o quadro de deterioração do setor (Souza, 1997). A partir de 1994, as concessões foram consideradas prioritárias e, em fevereiro e julho de 1995, foram aprovadas as Leis nºs 8.987 e 9.074, que dispunham sobre o regime de concessão e permissão dos serviços públicos, favorecendo o início das desestatizações cujo modelo consistia em: licitação, no mesmo leilão, da concessão do serviço público de transporte ferroviário de cargas prestado pela RFFSA; arrendamento dos ativos operacionais e venda de bens de pequeno valor de propriedade da RFFSA; manutenção da empresa estatal encarregada de administrar seus ativos não operacionais, de modo a auferir receita sobre eles e amortizar o seu endividamento, que não seria repassado à iniciativa privada; e criação de uma entidade encarregada de resolver,

em caráter administrativo, eventuais conflitos entre concessionária, usuários e o poder concedente (Souza, 2003).

Segundo Oliveira (2005) *apud* Lang (2007), o modelo proposto de divisão da malha da RFFSA, para realização das concessões, baseou-se nas superintendências regionais (SRs) da RFFSA, como apresentado na tabela 1. O objetivo era obter melhor configuração operacional para se constituírem em unidades de negócio independentes e autossuficientes, segundo os principais fluxos de transporte atuais e potenciais.

TABELA 1
Composição da RFFSA antes do processo de concessão iniciado em 1995

| Malha | Superintendências regionais | Sede das superintendências regionais | Ferrovias após a concessão | Extensão (km) |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|---------------|
| Tereza Cristina | SR 9 | Tuburão/SC | Ferrovia Tereza Cristina | 169 |
| | SR 2 | Belo Horizonte/MG | | |
| Malha Centro-Leste | SR 7 | Salvador/BA | Ferrovia Centro-Atlântica | 7.207 |
| | SR 8 | Campos/RJ | | |
| | SR 1 | Recife/PE | | |
| Malha Nordeste | SR 11 | Fortaleza/CE | Companhia Ferroviária do Nordeste ¹ | 4.654 |
| | SR 12 | São Luiz/MA | | |
| Malha Oeste | SR 10 | Bauru/SP | Ferrovia Novoeste ² | 1.621 |
| Malha Sudeste | SR 3 | Juiz de Fora/MG | MRS Logística | 1.633 |
| | SR 4 | São Paulo/SP | | |
| Malha Sul | SR 5 | Curitiba/PR | Ferrovia Sul-Atlântico ³ | 6.785 |
| | SR 6 | Porto Alegre/RS | | |
| Total | Administração geral (AG) | Rio de Janeiro/RJ | Todas administradas pela RFFSA | 22.069 |

Fonte: Silveira (2003) *apud* Silveira (2007).

Elaboração dos autores.

Notas: ¹ Atual Ferrovia Transnordestina S.A. (FTL).

² Atual América Latina Logística Malha Paulista (ALLMP-RMP).

³ Atual América Latina Logística Malha Sul (ALLMS-RMS).

Nos editais de concessão, foram estabelecidas as obrigações em atender metas de desempenho que norteavam os investimentos, pois não existiam indicações claras dos investimentos a serem realizados. Em março de 1996, foi estabelecido o Regulamento dos Transportes Ferroviários (RTF) (Brasil, 1996). Este regulamento foi publicado antes dos leilões dos ativos da RFFSA. Segundo Castro (2000) *apud* Lang (2007), o Decreto nº 1.832, de 4 de março de 1996, pouco avançava no sentido de detalhar os critérios de regulamentação dos pontos críticos do setor,

como: tarifas, desativação de ramais antieconômicos, interpenetração,⁴ tráfego mútuo e direito de passagem. Como parte do processo de privatização e frente à necessidade de regulamentação e fiscalização da prestação do serviço público de transporte ferroviário, em 2001, foi criada a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). A criação desta agência permitiu a regulamentação de penalidades, bem como dos direitos e deveres previstos nos contratos de concessão. Até então, houve um lapso de mais ou menos dez anos para ocorrer mudanças significativas no setor, notoriamente no marco regulatório e no plano de investimentos público privados, iniciados somente em julho de 2011 com as novas resoluções para o setor, resumidas no quadro 1.

QUADRO 1
Resoluções nºs 3.694/2011, 3.695/2011 e 3.696/2011

| Tema | Antes | Depois |
|----------------------------------|---|---|
| Legislação | Decreto nº 1.832/1996 da Presidência da República. | Resoluções nºs 3.694/2011, 3.695/2011 e 3.696/2011 da ANTT. |
| Tráfego mútuo | Havia possibilidade de compartilhamento de uma mesma via mediante pagamento, mas as condições de operações seriam estabelecidas pelas próprias concessionárias. | Os critérios para o tráfego mútuo são baseados na capacidade ociosa da via e nas metas de produção por trecho pactuado entre a concessionária e a ANTT. Mesmo assim, ocorrerá pagamento da requerente para a cedente. |
| Direito de passagem | Caso o tráfego mútuo não fosse possível, havia possibilidade de cessão da via a outra concessionária mediante pagamento. Novamente as condições de operações seriam estabelecidas pelas próprias concessionárias. | Os critérios para direito de passagem são baseados na capacidade ociosa da via e nas metas de produção por trecho pactuado entre a concessionária e a ANTT. Ocorrerá o pagamento da requerente para a cedente. |
| Impossibilidade de tráfego mútuo | As situações em que o tráfego mútuo não fosse possível não eram estabelecidas pela legislação. | Quando houver desacordo comercial entre as partes ou as características operacionais inerentes ao tráfego mútuo comprometem o atendimento eficiente da necessidade de transporte do usuário. |
| Condições de operação | Eram estabelecidas entre as concessionárias. | Baseiam-se em critérios claros estabelecidos pela legislação e informações pactuadas entre concessionárias e ANTT sobre a capacidade ociosa e metas de produção. |
| Inventário de capacidade | Não existia. | Anualmente, cada concessionária deve entregar à ANTT a Declaração de Rede, informando a capacidade instalada e ociosa. |
| Metas de produção por trecho | Não existia. | Anualmente, cada concessionária deve entregar Proposta de Pactuação de Metas de Produção e Metas de Segurança por Trecho. As metas apresentadas serão acordadas entre ANTT e concessionária. |

Fonte: CNT (2013).
Elaboração dos autores.

Dando continuidade ao processo de mudança do setor, em agosto de 2012, o governo federal anunciou o Programa de Investimentos em Logística (PIL). Entre as ações previstas no programa para o setor ferroviário, há a implantação de

um novo modelo de concessão em que haverá uma separação entre a atividade de fornecimento de infraestrutura ferroviária e a prestação do serviço de transporte ferroviário. Segundo CNT (2013), o modelo apresentado pelo governo federal é significativamente mais complexo que o atualmente em vigor no país. A iniciativa privada participará tanto da oferta de infraestrutura quanto do serviço de transporte ferroviário, mas em ambos haverá uma participação direta do ente público. Para a expansão e manutenção da malha ferroviária, serão firmadas parcerias público-privadas (PPPs) visando financiar o investimento e dar celeridade à execução das obras de engenharia, sendo a pessoa jurídica fruto dessa parceria com o gestor da infraestrutura ferroviária (GIF). Para garantir o retorno das PPPs e a concorrência no serviço de transporte ferroviário, a Engenharia, Construções e Ferrovias S/A (Valec) comprará a capacidade integral de transporte das ferrovias. Por meio de oferta pública, essa empresa venderá o direito de passagem às empresas de transporte ferroviário, chamadas de operadores ferroviários (OFs), nas malhas submetidas a esse modelo de concessão, para garantir a manutenção da modicidade tarifária e assegurar a oferta do serviço em trechos de menor demanda. Técnicos do governo aventam a relação de melhora de produtividade com o novo modelo, mas como seria este ganho de eficiência? Abordar-se-á tal tema no próximo item.

3 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

A produção pode ser definida como um processo pelo qual os insumos (*inputs*) são combinados e transformados em bens e serviços (*output*) (Case e Fair, 1999), bem como em unidades tomadoras de decisão (DMU, da sigla em inglês *decision making units*). Estudar a produção é de grande importância devido à escassez de recursos e ao desejo humano de utilizá-los plenamente. A noção microeconômica presume que as empresas (DMUs), no âmbito do mercado livre, devem alocar os *inputs* de forma eficiente com o objetivo de obter o lucro máximo e/ou custo mínimo a partir da produção de certos *outputs* (Erkoc, 2012).

Dyson (2001) afirma que a mensuração do desempenho tem um papel essencial na avaliação da produção, pois definirá o futuro da empresa. Thanassoulis (2001) identifica as seguintes informações que podem ser obtidas pela mensuração do desempenho: *i*) identificação de boas práticas operacionais para divulgação; *ii*) escala operacional mais produtiva; *iii*) espaço para ganhos de eficiência no uso dos recursos e/ou para o aumento da produção; *iv*) modelo mais adequado para uma unidade ineficiente melhorar seu desempenho; *v*) taxas marginais de substituição entre os fatores de produção; e *vi*) alteração ao longo do tempo da produtividade por cada unidade de operação e da forma mais eficiente dessas unidades em cada ponto no tempo. Produtividade e eficiência são dois conceitos importantes na medição do desempenho. A produtividade de uma firma pode ser definida como a relação entre o(s) *output(s)* e o(s) *input(s)* (Coelli, Prasada Rao e Battese, 1998). A

eficiência pode ser definida como a produtividade em relação ao tempo ou espaço, ou ambos (Lansink, Silva e Stefanou, 2001). Entretanto, para a formalização da análise por DEA (data envelopment analysis), devem-se considerar outros aspectos discutidos na próxima seção.

3.1 Análise envoltória de dados

Charnes *et al.* (1978) descrevem o DEA como um modelo matemático de programação aplicada a dados observáveis, que fornecem uma nova maneira de obter estimativas empíricas das relações, como as funções de fronteira das possibilidades de produção, que são pilares da economia moderna. A abordagem da DEA tem a vantagem de evitar a necessidade de atribuir uma medida *a priori* da importância relativa de qualquer *input* ou *output* comum e outras abordagens (como modelagem de regressão estatística) e resultou em seu uso em vários estudos nos setores governamental e sem fins lucrativos, regulatório e privado.

No DEA, a eficiência é calculada obtendo-se uma relação entre o vetor de *outputs* e de *inputs*, estando situada entre zero e um, sendo representada pela equação (1):

$$\theta = \frac{u_0 + u_1 y_1 + \dots + u_n y_n}{v_0 + v_1 x_1 + \dots + v_n x_n} \leq 1,0 \quad (1)$$

em que $\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ é o vetor de *inputs*; $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o vetor de *outputs*; u_i são os pesos dos *inputs*; e v_i os pesos dos *outputs*. Os primeiros modelos DEA desenvolvidos na década de 1960 foram: o modelo CRS (constant return scale – retornos constantes de escala) ou CCR (abreviatura dos nomes de seus criadores Charnes, Cooper e Rhodes, 1978), e o modelo VRS (variable return scale – retornos variáveis de escala) ou BCC (abreviatura de Banker, Charnes e Cooper, 1984). Toda a teoria que fomenta essa abordagem de tratamento de dados surgiu conforme as definições a seguir.

- 1) Definição 1.1 (eficiência – extensão da definição de Pareto-Koopmans): a eficiência completa (100%) é alcançada por qualquer DMU se, e somente se, nenhum de seus *inputs* e *outputs* podem ser melhorados sem o agravamento de alguns dos seus outros *inputs* ou *outputs*.

Essa definição apresenta um problema na maioria das aplicações de gestão ou ciências sociais, pois os possíveis níveis teóricos de eficiência não são conhecidos. Assim, a definição 1.1 é, portanto, substituída, destacando seus usos apenas com a informação que é empiricamente conforme a definição 1.2.

- 2) Definição 1.2 (eficiência relativa): a DMU deve ser classificada como totalmente eficiente (100%) com base na evidência disponível se, e somente se, os desempenhos das outras DMUs não mostrarem que

alguns de seus *inputs* ou *outputs* podem ser melhorados sem agravamento de alguns dos seus outros *inputs* ou *outputs*.

Essa definição evita a necessidade de recorrer a preços ou outras hipóteses de pesos, que são selecionados *a priori* e, também, a necessidade de especificar explicitamente as relações formais que deveriam existir entre *inputs* e *outputs*. Este tipo básico de eficiência, referida como “eficiência técnica” em economia, pode ser estendido a outros tipos de eficiência quando os dados, tais como preços e custos unitários, estão disponíveis para uso na DEA. Com base na definição 1.2., os modelos DEA podem ser subdivididos em termos de retornos de escala. Charnes, Cooper e Rhodes (1978) propuseram, inicialmente, a medição da eficiência da DMU para CRS, em que todas as DMUs estão operando em sua escala ótima; Banker, Charnes e Cooper (1984) introduziram as variáveis de retornos de escala (VRS), permitindo a quebra de eficiência na eficiência técnica e de escala na DEA. Assim, sendo Θ^* a função que descreve a relação entre *inputs* e *outputs* e a folga *si*, o quanto de *input* *i* precisa ser adicionado ou retirado para se obter o máximo de eficiência desejado cabe às definições 1.3 e 1.4, mais formal, para eficiência DEA.

- 3) Definição 1.3 (eficiência DEA): o desempenho do DMU_o é totalmente eficiente (100%) se, e somente se, ambos (1) $\Theta^* = 1$ e (2) todas as folgas $si - \neq 0$ e $si+ \neq 0$.
- 4) Definição 1.4 (fracamente eficiente): o desempenho do DMU_o é fracamente eficiente se, e somente se, ambos (1) $\Theta^* = 1$ e (2) $si - \neq 0$ e/ou $si+ \neq 0$ para algum *i* ou *r* em alguma alternativa ótima.

A seguir é apresentado o teorema para identificação do tipo de retorno de escala obtido de Banker e Thrall (1994) que identifica o sinal de Θ^* no modelo BCC.

- 1) Teorema 1.1: as condições de identificação dos retornos de escala para o modelo BCC são: IRS prevalece em (\hat{x}_0, \hat{y}_0) se, e somente se, $\Theta^* < 0$ para todas as soluções ótimas; DRS prevalece em (\hat{x}_0, \hat{y}_0) se e somente se, $\Theta^* > 0$ para todas as soluções ótimas; CRS prevalece em (\hat{x}_0, \hat{y}_0) se e somente se, $\Theta^* = 0$ para pelo menos uma solução ótima.

Aqui, pode-se notar, (\hat{x}_0, \hat{y}_0) são as coordenadas do ponto na fronteira de eficiência que é obtido a partir da projeção do modelo BCC sobre a fronteira na avaliação do DMU_o através da solução do modelo BCC.

3.1.1 Aplicação da DEA em transportes

Lan e Lin (2003), por meio de modelos DEA, investigam a eficiência técnica do serviço de 76 ferrovias no mundo durante o período de 1999 a 2001 e mostram que a maioria das ferrovias apresentaram retornos variáveis à escala. Complementarmente, os autores realizaram a detecção de *outliers* e análise de sensibilidade para a DMU

eficiente. Por seu turno, Malhotra, Malhotra e Lermack (2009) analisam o desempenho financeiro de sete ferrovias norte-americanas de carga utilizando a técnica DEA e indicam as empresas que operam de forma mais eficiente relativamente a outras do setor, diagnosticando pontos de melhora. Já Santos (2011) aplica a metodologia DEA para avaliar a eficiência produtiva das ferrovias de carga brasileiras com dados da ANTT de 2006 a 2009, objetivando avaliar se ferrovias de bitola larga seriam mais eficientes do que as ferrovias de bitola métrica, porém os resultados sugerem que esta hipótese deve ser refutada.

Em Caldas *et al.* (2012), analisou-se o desempenho operacional do transporte ferroviário de carga dos Estados Unidos e do Brasil com a ferramenta DEA e o resultado da modelagem DEA, utilizando CCR e algumas premissas simplificadoras, apontaram que os trechos americanos são mais eficientes que os brasileiros. Petrovic *et al.* (2012), com a mesma técnica DEA, mensuram a eficiência relativa do transporte ferroviário de cargas em países europeus durante o período de 2005 a 2009, concluindo que a melhoria dos indicadores de investimento (*inputs*) podem aumentar as receitas (*output*) das ferrovias europeias de carga.

Nag (2013) utilizou a DEA para determinar a eficiência das ferrovias indianas e compará-las com outras grandes ferrovias no mundo, bem como avaliar o desempenho relativo e o desempenho ao longo do tempo dessas ferrovias. O autor conclui que as ferrovias chinesas, indianas, japonesas, russas, italianas e norte-americanas são as mais eficientes do mundo. Complementarmente, o estudo revela que todos os *inputs* utilizados na análise são críticos e o desempenho das ferrovias indianas vem aumentando ao longo do tempo. Por fim, Bhanot e Singh (2014) aferem o desempenho das ferrovias indianas tendo em vista a quebra de monopólio decorrente das alterações da legislação do setor. Os autores analisam o segmento de transporte ferroviário de contêineres comparando dados secundários de terminais de contêineres de duas companhias privadas, Adani e Gateway Logistics, e uma estatal indiana, a Container Corporation of India (CONCOR). Os resultados apontam para um maior nível de eficiência para a CONCOR quando comparado com os agentes privados. Outro resultado apresentado é que o nível de eficiência da CONCOR é mais estável ao longo do tempo quando comparado com as grandes flutuações do nível de eficiência dos agentes privados.

3.2 Modelo Tobit

Tobin (1958) propôs o modelo, denominado Tobit, para descrever a relação entre uma variável dependente y_i não negativa e uma variável independente (ou vetor) x_i . O modelo supõe que há uma variável latente não observável, y_i^* . Esta variável depende linearmente de x_i pelo parâmetro (ou vetor) β que determina a relação entre a variável independente (ou vetor) x_i e a variável latente y_i^* , tal como no modelo linear. Na proposição, o termo de erro, u_i deve ser normalmente distribuído para

capturar influências aleatórias. A variável observável, y_i , é definida para ser igual à variável latente (Tobin, 1958; Amemiya, 1984; 1985). A equação estrutural do modelo é:

$$y_i^* = X_i\beta + u_i, \quad (2)$$

onde $u_i \sim N(0, \sigma^2)$. y_i^* é uma variável latente observada com os valores maiores do que τ e censuradas caso contrário. O y_i observado é definido pela equação 3. No modelo Tobit típico, assume-se que $\tau = 0$, ou seja, os dados são censurados em 0. Assim, tem-se:

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & \text{se } y_i^* \leq 0. \\ 0 & \text{se } y_i^* > 0. \end{cases} \quad (3)$$

A censura de dados ocorre quando os dados da variável dependente são perdidos (ou limitados), mas não os dados dos regressores. Quando uma distribuição é censurada no lado esquerdo, as observações com valores iguais ou inferiores a τ são definidos para τ_y (Amemiya, 1973):

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & \text{se } y_i^* \leq \tau. \\ \tau & \text{se } y_i^* > \tau. \end{cases} \quad (4)$$

O uso de τ e τ_y são apenas uma generalização de ter τ e τ_y igual a 0. Se uma variável contínua y tem uma função densidade de probabilidade $f(y)$ e τ é uma constante, então temos:

$$f(y) = [f(y^*)]^{d_i} [F(\tau)]^{1-d_i}. \quad (5)$$

Em outras palavras, a densidade de y é a mesma que para y^* , para $y > \tau$, e é igual à probabilidade de observar $y^* < \tau$ se $y = \tau$. d_i é uma variável indicadora que é igual a 1 se $y > \tau$, ou seja, a observação é censurada e é igual a 0 se $y = \tau$. A função de verossimilhança pode ser escrita como (Schnedler, 2005):

$$L = \prod_i^N \left[\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right) \right]^{d_i} \left[1 - \phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right) \right]^{1-d_i}. \quad (6)$$

O valor esperado de uma variável censurada é:

$$E[y] = (P(\text{não censurado}) \times E[y | y > \tau]) + (P(\text{não censurado}) \times E[y | y = \tau]).$$

$$E[y] = \left\{ \phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right) [\mu + \sigma\lambda(\alpha)] \right\} + \phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right) \tau_y. \quad (7)$$

Para o caso particular de quando $\tau = 0$, temos:

$$E[y] = \phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) [\mu + \sigma\lambda], \quad (8)$$

onde,

$$\lambda = \frac{\phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)} \quad (9)$$

3.2.1 Aplicação de regressão Tobit em transportes

Li e Hu (2010) analisam o sistema ferroviário da China, identificando os principais fatores que afetam a eficiência por meio de regressão Tobit. Após avaliarem a eficiência ferroviária, aplicam a metodologia DEA e Índice Malmquist de Produtividade Total de Fatores (MPI). Eles concluem que o sistema ferroviário chinês apresenta baixos níveis de eficiência técnica global e evidencia o desequilíbrio no desenvolvimento do sistema, mostrando que as ferrovias que operam no leste do país possuem melhores níveis de eficiência e as que operam no oeste apresentaram maior potencial de crescimento da produção ferroviária. Eles apontam como fatores dessa ineficiência o desenvolvimento da economia regional, a população, a densidade ferroviária e a densidade rodovia.

Kutlar, Ali Kabasakal e Sarikaya (2013) mediram o desempenho das ferrovias de passageiro e carga em todo o mundo com dados de 2000 a 2009, correlacionando os *inputs* da DEA por regressão Tobit, utilizando uma amostra de 31 empresas ferroviárias. Os resultados mostram que a mesma composição de *inputs* usados na análise Tobit dá resultados mais compatíveis com os escores de eficiência alocativa, quando comparado com os escores de eficiência técnica. Por seu turno, Merkert, Smith e Nash (2009) objetivavam determinar o impacto da estrutura institucional, o tamanho das empresas, grau de concorrência, tipo de operação e o nível de custos de transação sobre a eficiência técnica e global e, para tanto, aplicam regressões Tobit para aferir o grau de influência dos *inputs* utilizados nos modelos DEA nas eficiências calculadas, utilizando 43 empresas ferroviárias de passageiros e cargas da Inglaterra, Alemanha e Suécia. Os resultados mostram que a separação vertical não tem efeito sobre a eficiência técnica e de custo, mas apresenta um efeito marginal negativo sobre a eficiência alocativa e que a concorrência de operação de trens de carga diminui a eficiência e os custos de transação possuem

uma associação negativa com todas as eficiências. Chen (2010) explora a relação entre implantação do Taiwan High Speed Rail (THSR) e a eficiência econômica regional de Taiwan, usando dados anuais de 2004 a 2010 e aplicando o método DEA e a regressão Tobit. Os resultados indicam que as eficiências médias para as regiões analisadas estão se deteriorando desde o início da operação do THSR em 2007. De acordo com os resultados da regressão Tobit, as eficiências médias, para as regiões, tiveram uma melhora no curto prazo, mas uma piora no longo prazo, indicando que a construção de infraestrutura de transporte não estimulou o desenvolvimento econômico regional.

Tsai, Mulley e Merkert (2014) avaliam os fatores que impulsionam a eficiência operacional dos sistemas ferroviários urbanos por meio de regressão Tobit. Eles avaliam os determinantes das eficiências calculadas pelos modelos DEA, utilizando dados de sistemas ferroviários urbanos internacionais entre 2009 e 2011. Os resultados identificam sistemas com eficiência alocativa e de custos (por exemplo, Hong Kong) e sistemas com um melhor desempenho em termos de eficiência (por exemplo, Sydney) e que o número de estações influencia a eficiência técnica e o fator determinante da eficiência alocativa é o custo e a densidade populacional. Por fim, Sameni e Preston (2012) analisam a eficiência dos operadores de passageiros da Grã-Bretanha na utilização da capacidade. Com os escores de eficiência resultantes da aplicação do modelo DEA, avalia-se por modelo de regressão Tobit os fatores da eficiência. Os resultados mostram que existe correlação positiva entre operar na região de Londres e os escores de eficiência. Além disso, também é verificada a existência de correlação negativa entre a oferta de serviços regionais e os escores de eficiência.

4 METODOLOGIA E ESPECIFICAÇÃO DOS MODELOS

Esta seção apresentará a proposta metodológica, a definição dos modelos e será aplicado o procedimento para as concessionárias ferroviárias em operação no Brasil.

4.1 Procedimento metodológico

Com base na revisão bibliográfica, realizada nas seções anteriores, foram selecionadas as seguintes variáveis. Estas serão utilizadas como *inputs* nos modelos DEA: número de trens formados; consumo de combustível; utilização de locomotiva; utilização de vagão; e número de empregados.

QUADRO 2
Especificação dos modelos DEA

| Cenário | Modelo | Objetivo | Inputs | Output |
|-------------------------------|--------|---|--|----------------------------------|
| Retornos constantes de escala | CCR | Medir a eficiência da produção do transporte de cargas. | Número de trens formados; consumo de combustível; utilização de locomotiva; utilização de vagão; número de empregados. | Toneladas por quilômetros úteis. |
| Retornos variáveis de escala | BCC | Medir a eficiência da produção do transporte de cargas. | Número de trens formados; consumo de combustível; utilização de locomotiva; utilização de vagão; número de empregados. | Toneladas por quilômetros úteis. |

Fonte: Macambira Filho (2014).
Elaboração dos autores.

Para o *output* dos modelos DEA, foi selecionada a variável *toneladas por quilômetro úteis*. De posse das variáveis, foram testados dois modelos DEA – apresentados no quadro 2 –, estabelecidos conforme as equações 10 e 11. Ambas utilizam onze DMUs, cinco *inputs* e um *output*.

$$\max z = \mu y_0 \quad (10)$$

sujeito a

$$\mu y_j - \sum_{i=1}^5 v_i x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, 11;$$

$$\sum_{i=1}^5 v_i x_{i0} = 1;$$

$$\mu_r, v_i \geq 0;$$

$$\max z = \mu y_0 - u_0. \quad (11)$$

sujeito a

$$\mu y_j - \sum_{i=1}^5 v_i x_{ij} - u_0 \leq 0 \quad j = 1, \dots, 11;$$

$$\sum_{i=1}^5 v_i x_{i0} = 1;$$

$$\mu_r, v_i \geq \varepsilon, u_0 \text{ livre em sinal};$$

Após obtenção das eficiências técnicas, θ_i^* , pelos modelos DEA, estas serão correlacionadas por meio de regressão Tobit, com os *inputs* utilizados nos modelos DEA para determinar o nível de influência desses *inputs* na eficiência técnica, conforme equação 12, dada a restrição 13.

$$\theta_i^* = X_i \beta + u_i, \quad (12)$$

onde,

$$\theta_i = \begin{cases} \theta^* & \text{se } \theta^* \leq 0. \\ 0 & \text{se } \theta^* > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Onde θ representa o vetor dos escores de eficiência e $z^* = \min \theta = \theta^*$.

Complementarmente, executa-se o algoritmo de Simar e Wilson (1998) e o teste de retornos conforme apontado em Bogetoft e Otto (2011). O *bootstrap* parte da hipótese de que se a distribuição empírica de uma variável (no caso deste trabalho, o escore de eficiência) corresponder mais ou menos para a verdadeira distribuição, então a distribuição empírica da estatística de *t* de *student* corresponderá mais ou menos à verdadeira distribuição de *t* de *student* da eficiência. Com a amostra de *bootstrap*, determinam-se diretamente os intervalos de confiança para a estatística, sendo os resultados desta mais precisos do que a construção de intervalos de confiança baseados no desvio-padrão estimado, uma vez que esta última se baseia no pressuposto de que a distribuição em teste é simétrica e pode ser razoavelmente aproximada usando uma distribuição normal.

Tecnicamente o algoritmo funciona da seguinte forma: tome a definição 1.1, $\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ é o vetor de *outputs*, $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o vetor de *inputs*, calcula-se Θ^* , conforme equação 11. Assume-se que os *inputs* e *outputs* das amostras são uma realização de variáveis aleatórias distribuídas de forma idêntica e independentemente com probabilidade $P(\cdot)$. Gera-se $P^*(\cdot)$ como estimativa de $P(\cdot)$ com base em Θ^* obtidos. A relação entre $P^*(\cdot)$, $P(\cdot)$ e Θ^* são complexas e gerarão estimadores Θ^{k*} . Dadas as replicações, calcula-se a média e a variância das eficiências com *bootstrap* conforme equações 14 e 15.

$$\bar{\theta}^{k*} = \frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B \theta^{kb} \quad (14)$$

$$Var(\theta^{k*}) = \frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B (\theta^{kb} - \bar{\theta}^{k*})^2 \quad (15)$$

Os resultados obtidos são utilizados para calcular intervalos de confiança e aplicar teste de hipótese de modelo mais adequado aos dados conforme apresentado em Simar e Wilson (1998; 1999; 2000) e Bogetoft e Otto (2011).

4.2 Dados descritivos

As informações utilizadas neste estudo provêm do banco de dados do Sistema de Acompanhamento e Fiscalização do Transporte Ferroviário (Saff) da ANTT. Na análise, não foram considerados os dados da concessionária Ferrovia Norte-Sul (FNSTN), pois o início de sua operação deu-se a partir de 2008. As variáveis utilizadas para aplicação dos modelos estão descritas a seguir.

- 1) tku – toneladas por quilômetro útil, que corresponde à produção ferroviária, ou seja, ao somatório do produto entre o volume transportado, em toneladas úteis (tu), e a distância percorrida, em quilômetros (km), de cada composição transitada na malha concedida ou na malha de outras ferrovias, na realização do transporte de carga própria ou de terceiros.
- 2) ntf – número de trens formados, que corresponde ao número total de trens de carga formados no período.
- 3) ccl – consumo de combustível, que representa o somatório da quantidade de combustível, em litros (l), consumido pelas locomotivas diesel-elétricas utilizadas para o desempenho das operações de transporte, manobra e serviço.
- 4) ul – utilização de locomotiva de frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de locomotivas utilizadas no transporte de carga, inclusive em carga própria, em locomotiva.hora, por modelo de locomotiva própria, arrendada, alugada, de outras concessionárias e de terceiros no período considerado.
- 5) uv – utilização de vagão de frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de vagões carregados no serviço remunerado e carga própria, em vagão.dia, por tipo de vagões próprios, arrendados, alugados e de terceiros (exceto de outras ferrovias), no período considerado.
- 6) ne – número de empregados por lotação, que corresponde ao efetivo total de empregados por área de atuação e por tipo de vínculo empregatício com a concessionária, sendo *próprios* para os empregados com vínculo empregatício com a concessionária ou *terceirizados* para os trabalhadores de empresas contratadas para a prestação de serviços nas instalações da concessionária. Em ambos os casos, considera-se a quantidade no último dia do mês informado.

A seguir são apresentadas, para cada concessionária, algumas estatísticas descritivas dos dados utilizados na tabela 2.

TABELA 2
Estatísticas descritivas das variáveis por concessionárias

| América Latina Logística Malha Norte (ALLMN-RMN) – rumo malha norte | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 1.256.560.097 | 1.224.930.144 | 482.156.056 | 179.203.788 | 2.300.403.035 |
| NTF | 316 | 295 | 125,7327471 | 64 | 792 |
| CCL | 7 | 7 | 2 | 2 | 10 |
| UL | 268 | 237 | 97 | 153 | 416 |
| UV | 4.683 | 4.992 | 2.061 | 250 | 7.711 |
| NE | 1.677 | 1.604 | 300,9789409 | 1142 | 2.438 |
| América Latina Logística Malha Oeste (ALLMO-RMO) – rumo malha oeste | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 125.357.119 | 124.712.524 | 26.408.767 | 48.721.115 | 173.738.563 |
| NTF | 814,0462963 | 661,5 | 369,8907741 | 126 | 1692 |
| CCL | 13 | 12 | 2 | 9 | 18 |
| UL | 68 | 64 | 16 | 37 | 94 |
| UV | 2.007 | 1.755 | 1.035 | 37 | 3.534 |
| NE | 910 | 898 | 139 | 224 | 1.228 |
| América Latina Logística Malha Paulista (ALLMP-RMP) – rumo malha paulista | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 286.584.230 | 280.685.435 | 101.628.999 | 62.934.882 | 570.742.930 |
| NTF | 1.315 | 799 | 859,6448281 | 246 | 3.167 |
| CCL | 13 | 13 | 3 | 8 | 20 |
| UL | 174 | 159 | 74 | 79 | 328 |
| UV | 5.567 | 3.463 | 3.586 | 138 | 11.251 |
| NE | 1.700 | 1.926 | 545,7489494 | 598 | 2.332 |
| América Latina Logística Malha Sul (ALLMS-RMS) – rumo malha sul | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 1.412.203.451 | 1.406.180.133 | 210.715.453 | 1.014.634.862 | 1.938.774.169 |
| NTF | 4500,342593 | 4090 | 1438,358476 | 2499 | 7507 |
| CCL | 9 | 9 | 1 | 7 | 20 |
| UL | 449 | 459 | 61 | 336 | 530 |
| UV | 12.610 | 14.241 | 4.477 | 472 | 16.620 |
| NE | 5.868 | 5.528 | 1.297 | 3.395 | 8.189 |

(Continua)

(Continuação)

| Estrada de Ferro Carajás (EFC) | | | | | |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 7.680.735.232 | 7.500.472.033 | 1.155.203.464 | 5.245.464.071 | 10.789.157.756 |
| NTF | 1.298 | 1.340 | 258,7299799 | 718 | 1.735 |
| CCL | 2 | 2 | 0 | 2 | 3 |
| UL | 212 | 215 | 34 | 128 | 257 |
| UV | 11.119 | 11.846 | 4.497 | 205 | 16.739 |
| NE | 4.645 | 4.377 | 1078,71942 | 2.642 | 8.181 |
| Estrada de Ferro (EFPO) | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 34.846.534 | 24.566.559 | 28.000.877 | 1.251.220 | 125.702.883 |
| NTF | 93 | 89 | 28,4866644 | 42 | 180 |
| CCL | 4.399 | 15 | 8.893 | 8 | 67.664 |
| UL | 9 | 10 | 5 | 1 | 16 |
| UV | 175 | 100 | 205 | 14 | 976 |
| NE | 150 | 149 | 13,59851813 | 114 | 176 |
| Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 5.977.037.513 | 6.208.123.352 | 755.226.636 | 3.526.142.811 | 7.042.718.668 |
| NTF | 4.424 | 4.536 | 531,4719318 | 2.915 | 5.210 |
| CCL | 3 | 3 | 2 | 3 | 19 |
| UL | 317 | 316 | 23 | 132 | 377 |
| UV | 16.609 | 19.459 | 6.293 | 132 | 20.833 |
| NE | 6.435 | 6.252 | 1215,897832 | 4.740 | 8.978 |
| Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 1.246.833.092 | 1.263.970.756 | 278.166.333 | 586.852.505 | 1.795.421.835 |
| NTF | 4.297 | 4.265 | 632,0899509 | 2.270 | 5.602 |
| CCL | 210 | 12 | 1.449 | 4 | 10.751 |
| UL | 562 | 530 | 160 | 113 | 1.702 |
| UV | 11.116 | 11.696 | 4.061 | 113 | 16.195 |
| NE | 6.370 | 6.221 | 961,0311795 | 4.234 | 8.948 |

(Continua)

(Continuação)

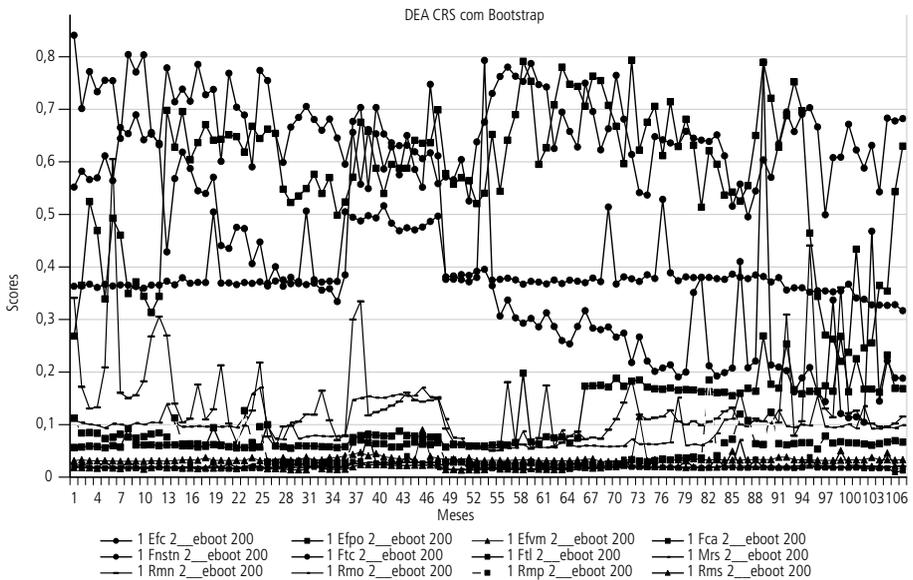
| Ferrovia Tereza Cristina (FTC) | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 17.251.327 | 16.549.073 | 3.399.771 | 8.477.503 | 26.738.189 |
| NTF | 1.033 | 1.027 | 138,5686319 | 482 | 1.341 |
| CCL | 7 | 7 | 1 | 6 | 9 |
| UL | 11 | 11 | 1 | 9 | 15 |
| UV | 335 | 370 | 116 | 11 | 404 |
| NE | 278 | 288 | 36,09368219 | 224 | 352 |
| MRS Logística | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 4.766.993.275 | 4.813.306.084 | 676.000.256 | 2.985.415.224 | 5.921.861.220 |
| NTF | 9.006 | 9.460 | 1718,080384 | 5.902 | 11.777 |
| CCL | 5 | 5 | 0 | 4 | 7 |
| UL | 671 | 682 | 114 | 451 | 874 |
| UV | 15.783 | 18.026 | 5.701 | 663 | 20.235 |
| NE | 7.062 | 7.465 | 2834,77348 | 3.657 | 11.564 |
| Transnordestina Logística SA (FTL) | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 60.562.467 | 58.440.305 | 13.648.133 | 36.614.498 | 104.878.560 |
| NTF | 565 | 714 | 362,3391166 | 105 | 1.051 |
| CCL | 15 | 15 | 2 | 9 | 19 |
| UL | 119 | 123 | 15,76333656 | 84 | 160 |
| UV | 1.834 | 2.098 | 653 | 104 | 2.442 |
| NE | 1747,342593 | 1750 | 227,5372481 | 1320 | 2344 |
| Ferrovia Norte-Sul (FNTSN) | | | | | |
| Variável | Média | Mediana | Desvio-padrão | Mínimo | Máximo |
| TKU | 215.812.401 | 197.613.488 | 154.178.479 | 0 | 699.839.709 |
| NTF | 144 | 149 | 61,44731271 | 6 | 324 |
| CCL | 5 | 4 | 2 | 2 | 18 |
| UL | 22 | 15 | 20 | 0 | 105 |
| UV | 833 | 560 | 767 | 4 | 3.301 |
| NE | 285 | 231 | 309,1439003 | 0 | 1.655 |

Fonte: Macambira Filho (2014).
Elaboração dos autores.

4.3 Modelos e resultados

Os resultados para cada DMU (concessionária) foram obtidos para modelos DEA, considerando retornos constantes à escala e retornos variáveis à escala. No gráfico 1, são apresentadas as séries temporais com a posição calculada (ordem dos escores classificados do maior para o menor) da DMU em cada período de análise para estimativas de DEA CRS sem *bootstrap*, seguindo-se com a análise dos resultados.

GRÁFICO 1
Estimação de eficiência das concessionárias sem *bootstrap* – modelo CRS



Fonte: Macambira Filho (2014).
Elaboração dos autores.

Analisando os resultados da DMU da ALLMN-RMN, pode-se observar que os escores das eficiências técnicas calculadas, a partir dos dois modelos DEA utilizados, apresentaram patamares elevados, porém distintos entre 2006 e 2008. Sendo que, a partir de 2009, houve uma convergência de valores acompanhada por uma tendência de crescimento. Durante o período de análise, a eficiência técnica do modelo DEA-VRS apresentou níveis mais elevados quando comparado com o modelo DEA-CRS. Os resultados sugerem significativas melhoras dos níveis de eficiências técnicas da ALLMN-RMN. Em janeiro de 2006, os escores, para ambas as eficiências, eram 0,498, e em dezembro de 2011, passaram a ser 0,883 para a TE-CRS e 1,0 para TE-VRS. A posição mais observada pela DMU da ALLMN-RMN foi a terceira colocação, com 32 vezes (44% do total de períodos).

Na maior parte do período de análise, a ALLMN-RMN apresentou, predominantemente, retornos crescentes à escala (72% do total de períodos), o que se traduz em eficiência alocativa, ou seja, seus níveis de eficiência podem ser aumentados por meios de investimentos nos fatores de produção (insumos). A partir de 2009, a ALLMN-RMN passou a apresentar ineficiência alocativa, com o surgimento de retornos decrescentes à escala (14% do total de períodos), possivelmente, consequência do início da operação da FNSTN que passou a competir com a ALLMN-RMN no transporte de granéis agrícolas da região Centro-Oeste. Os resultados da DMU da ALLMN-RMN mostram baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, patamares semelhantes e uma tendência de melhora para as eficiências técnicas.

Os resultados também revelam que houve um aumento nos níveis das eficiências técnicas da ALLMO-RMO, comportando-se de forma semelhante à ALLMO-RMN. Em relação ao *ranking* de classificação, a posição mais observada pela DMU da ALLMO-RMO foi a décima colocação, com 28 vezes (39% do total de períodos). Sua pior classificação foi a 11ª posição, a qual ocupou por dez vezes (14% do total de períodos). Em agosto de 2008 e dezembro de 2009, ela obteve sua melhor classificação, a sexta posição. Observando os retornos à escala, pode-se perceber que a DMU da ALLMO-RMO não opera em escala ótima. Na maior parte do período de análise, a ALLMO-RMO apresentou, predominantemente, retornos crescentes à escala (94% do total de períodos), o que mostra eficiência alocativa dos fatores de produção (insumos).

Os resultados da DMU da ALLMP-RMP revelam os baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, além de patamares semelhantes e uma tendência de melhora para as eficiências técnicas. A posição mais ocupada pela DMU da ALLMP-RMP foi a sexta colocação, com 27 vezes (38% do total de períodos). Em novembro de 2011, ela ocupou a 11ª posição, sua pior classificação no período de análise. Em dezembro de 2010 e maio de 2011, ela obteve sua melhor classificação, quinta posição. Analisando os retornos à escala, pode-se perceber que a DMU da ALLMN-RMN não opera em escala ótima. Durante o período de análise, a ALLMP-RMP apresentou eficiência alocativa em 2006 e 2007; e ineficiência alocativa de 2008 a 2011. Os retornos crescentes à escala corresponderam a 64% do total de períodos e os retornos decrescentes à escala 35% do total de períodos. A ALLMS-RMS obteve baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, e um comportamento semelhante em que os escores das eficiências técnicas flutuam em torno do valor médio de 0,258. Os resultados também evidenciam estagnação dos níveis de eficiências técnicas da ALLMS-RMS. Em relação ao *ranking* de eficiência, a posição mais ocupada pela DMU da ALLMS-RMS foi a sétima colocação, 18 (25% do total de períodos). Em janeiro de 2007, ela ocupou a 11ª posição, sua pior classificação no período de análise, e, de agosto de 2011 a novembro de 2011, ela

obteve sua melhor classificação, sexta posição. Já em relação à natureza dos retornos à escala, pode-se perceber que a DMU da ALLMS-RMS não opera em escala ótima. Durante o período de análise, a ALLMP-RMP apresentou eficiência alocativa de 2006 a 2008, e ineficiência alocativa de 2009 a 2011. Os retornos crescentes à escala corresponderam a 79% do total de períodos e os retornos decrescentes à escala, 21%.

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) mostra que ela pode ser considerada *benchmarking*. Durante todo o período de análise ela operou em escala ótima, apresentando apenas retornos constantes à escala e escores 1,000 para TE-CRS e TE-VRS. Além disso, a EFC só não ocupou primeira colocação no *ranking* de eficiência em março de 2008. Já a Estrada de Ferro (EFPO) apresentou elevados níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, e pequena flutuação no final do período de análise, mas apresentou estabilidade dos níveis de eficiência, ou seja, pouca variabilidade no indicador de eficiência. Em relação ao *ranking* de eficiência, a posição mais ocupada pela DMU da EFPO foi a primeira colocação, 44 vezes (61% do total de períodos). Em maio de 2011, ela ocupou a sétima posição, sua pior classificação no período de análise. Os retornos à escala para EFPO operaram em escala ótima, apresentando retornos constantes à escala. A partir de setembro de 2008, ela passou a apresentar eficiência alocativa com retornos crescentes à escala. Durante o período de análise, os retornos constantes à escala corresponderam a 74% do total de períodos e os retornos crescentes à escala, 26%.

A Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) apresentou patamares distintos e elevados durante o período de análise e uma tendência de redução nos níveis de eficiência. No período de análise, os escores da TE-VRS apresentaram níveis mais elevados quando comparado aos escores da TE-CRS. O valor médio dos escores das variáveis TE-VRS e TE-CRS foram, respectivamente, 0,841 e 0,711. A posição mais ocupada da EFVM foi a quarta colocação, 35 vezes (63% do total de períodos). Em março de 2009, ela obteve sua pior classificação, sexta posição, e ocupou a primeira localização em seis períodos distintos. Com relação à natureza dos retornos à escala, pode-se perceber que a DMU da EFVM não está operando em escala ótima. Na maior parte do período de análise, a EFVM apresentou eficiência alocativa, obtendo retornos crescentes à escala em 83% do total de períodos. Os retornos decrescentes à escala, que correspondem a 15% do total de períodos, estão concentrados entre 2006 e 2008, sendo que houve apenas uma ocorrência depois de 2009.

A Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) pode constatar os baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, além de patamares semelhantes e uma tendência de aumento dos escores das eficiências técnicas. Os resultados revelam uma elevação dos níveis de eficiências técnicas da FCA. Em janeiro de 2006, os escores eram 0,175 para TE-CRS e 0,176 para TE-VRS; e, em dezembro de 2011, passaram a ser 0,307 para a TE-CRS e 0,310 para TE-VRS. A posição mais ocupada pela

FCA foi a oitava, com 27 vezes (28% do total de períodos). Em junho de 2006 e janeiro de 2008, ela ocupou a 11ª posição, sua pior classificação no período de análise. A melhor posição ocupada pela FCA foi a sexta colocação, por seis vezes. Analisando os retornos de escala, pode-se perceber que a FCA não opera em escala ótima. Durante o período de análise, a FCA apresentou eficiência alocativa nos anos de 2006 até meados de 2009, e ineficiência alocativa a partir desta última data. Os retornos crescentes à escala corresponderam a 77% do total de períodos e os retornos decrescentes à escala, 25%.

Analisando os resultados da DMU da FTC pode-se constatar os baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, e um comportamento semelhante em que os escores das eficiências técnicas flutuam em torno do valor médio de 0,288. Durante o período de análise, os escores médios da TE-CRS e TE-VRS foram, respectivamente, 0,283 e 0,293. Os resultados também evidenciam uma estagnação dos níveis de eficiências técnicas da FTC. Em janeiro de 2006, os escores eram 0,247 para TE-CRS e TE-VRS; e, em dezembro de 2011, passaram a ser 0,299 para a TE-CRS e TE-VRS. A FTC foi a sexta colocação, com dezoito vezes (31% do total de períodos). A pior colocação da FTC foi a décima posição, ocupada por nove vezes. Em fevereiro de 2008, ela obteve sua melhor classificação, terceira posição. Já em relação à natureza dos retornos à escala, pode-se perceber que a DMU da FTC está operando em escala ótima, uma vez que ela obteve apenas retornos constantes à escala.

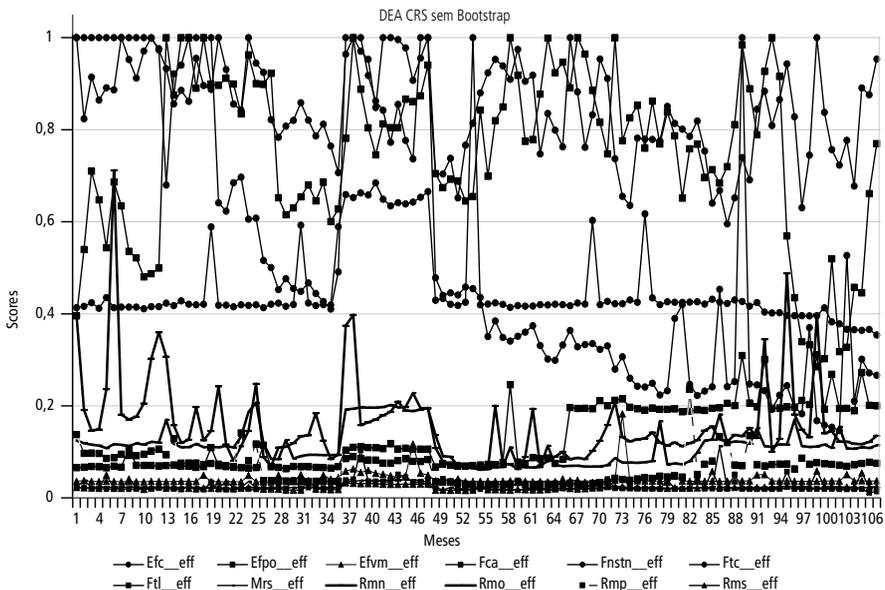
A MRS apresentou patamares elevados e distintos, no início e no fim do período de análise. Além disso, é evidente a estagnação dos níveis de eficiência. Durante o período de análise, os escores da TE-VRS apresentaram níveis mais elevados quando comparados aos escores da TE-CRS. O valor médio dos escores das variáveis TE-VRS e TE-CRS foram, respectivamente, 0,630 e 0,690. A MRS foi a quinta colocação, com vinte vezes (28% do total de períodos). Seus retornos à escala não se revelaram em escala ótima, mas, na maior parte do período de análise, a MRS apresentou eficiência alocativa obtendo retornos crescentes à escala em 85% do total de períodos. Os retornos decrescentes à escala, que correspondem a 13% do total de períodos, estão concentrados entre 2010 e 2011.

A FTL-FTNL apresentou baixos níveis de eficiência técnica, TE-CRS e TE-VRS, e um comportamento semelhante em que os escores das eficiências técnicas flutuam em torno do valor médio de 0,1618. Durante o período de análise, os escores médios da TE-CRS e TE-VRS foram, respectivamente, 0,158 e 0,166. Em julho de 2011, as eficiências técnicas obtiveram seus menores escores, 0,104 para TE-CRS e 0,105 para TE-CRS. Os resultados evidenciam uma estagnação dos níveis de eficiências técnicas da FTL. A posição mais ocupada pela FTL foi a 11ª, com 58 vezes (81% do total de períodos). A sua melhor colocação foi a sexta, ocupada em novembro de 2008. Já em relação à natureza dos retornos à escala,

pode-se perceber que a DMU-FTL está operando em escala ótima. Ela apresentou eficiência alocativa na maior parte do período de análise (88% do total de períodos) e retornos constantes à escala nos outros 12%.

Executou-se *bootstrap* com duzentas, quinhentas e mil replicações do modelo DEA com retornos constantes baseados nos trabalhos de Simar e Wilson (1998; 1999; 2000) e aplicados no pacote *benchmarking* do R Project indicado no livro do Bogetoft e Otto (2011). Os resultados com aumento do número de replicações não mudaram consideravelmente os resultados, portanto, apresenta-se no gráfico 2 apenas o *bootstrap* com duzentas replicações. São apresentadas as séries temporais com a posição calculada (ordem dos escores classificados do maior para o menor) da DMU em cada período de análise para estimativas de DEA CRS e com *bootstrap* (gráfico 2). Na sequência, apresenta-se a tabela 3 com os valores médios de diferença entre a estimativa com e sem *bootstrap* em termos percentuais e a estatística do intervalo de confiança.

GRÁFICO 2

Estimativa de eficiência das concessionárias com *bootstrap*

Fonte: Macambira Filho (2014).
 Elaboração dos autores.

O teste sugerido por Simar e Wilson (2002; 2011) foi realizado. Nele obtiveram-se resultados do *bootstrap* quanto a retornos de escala com a hipótese nula de retornos constantes de escala frente à alternativa de retornos variáveis, concluindo por não rejeição da hipótese nula – portanto, o modelo de retornos

constantes de escala é aceita. Assim, o modelo CRS é o adequado e os resultados do *bootstrap*, embora resultem em valores menores do que o do modelo DEA CRS, replicam o comportamento encontrado no modelo. Valendo as discussões de resultado anterior.

Nas tabelas 3 e 4, são apresentadas as estimações do modelo Tobit, aplicado nos *inputs* utilizados no modelo DEA, considerando retornos constantes e variáveis de escala para as onze concessionárias ferroviárias selecionadas, para avaliar se estes *inputs* estão correlacionados com as eficiências técnicas resultantes da aplicação do modelo DEA. Embora o teste utilizando o *bootstrap* sugira retornos constantes de escala, decidiu-se fazer dois modelos Tobit para verificar se haveria divergência dos resultados ao adotar especificação diferente da sugerida no teste de Simar e Wilson (2002; 2011).

TABELA 3
Resultados da regressão Tobit para a variável dependente eficiência técnica considerando retornos constantes à escala

| Coefficiente | Estimativa | Erro-padrão | Teste-z | p-valor |
|--------------|-------------------------|-----------------------|---------|---------|
| Constante | 0,374435 | 0,010516 | 35,6 | <0,0001 |
| NTF | $-2,929 \cdot 10^{-05}$ | $3,97 \cdot 10^{-06}$ | -7,377 | <0,0001 |
| CCL | $1,60 \cdot 10^{-05}$ | $4,58 \cdot 10^{-06}$ | 3,492 | 0,0005 |
| UL | -0,000641300 | $8,01 \cdot 10^{-05}$ | -8,011 | <0,0001 |
| UV | 4,50E-06 | $2,02 \cdot 10^{-06}$ | 2,226 | 0,026 |
| NE | $1,94 \cdot 10^{-05}$ | $6,62 \cdot 10^{-06}$ | 2,935 | 0,0033 |
| χ^2 | 705,0188 | | | <0,0001 |

Elaboração dos autores.

TABELA 4
Resultados da regressão Tobit para a variável dependente eficiência técnica considerando retornos variáveis à escala

| Coefficiente | Estimativa | Erro-padrão | Teste-z | p-valor |
|--------------|------------------------|-----------------------|---------|---------|
| Constante | 0,514 | 0,017 | 30,15 | <0,0001 |
| NTF | $-9,73 \cdot 10^{-05}$ | $6,48 \cdot 10^{-06}$ | -15,01 | <0,0001 |
| CCL | $7,00 \cdot 10^{-08}$ | $4,16 \cdot 10^{-09}$ | 16,82 | <0,0001 |
| UL | $-2,47 \cdot 10^{-06}$ | $4,07 \cdot 10^{-07}$ | -6,055 | <0,0001 |
| UV | $5,53 \cdot 10^{-07}$ | $1,82 \cdot 10^{-07}$ | 3,034 | 0,0024 |
| NE | $-5,10 \cdot 10^{-05}$ | $8,46 \cdot 10^{-06}$ | -6,024 | <0,0001 |
| χ^2 | 612,380 | | | <0,0001 |

Elaboração dos autores.

Observa-se que todos os *inputs* utilizados possuem correlação significativa com a variável dependente, TE-CRS, quando se considera a estatística z , que mede o nível de significância do parâmetro. Pode-se ainda concluir que os coeficientes NTF, CLL, UL e NF são estatisticamente significantes no nível de 1% de significância, e o coeficiente UV é estatisticamente significativo no nível de 5% de significância. Esses resultados indicam que quase todos os coeficientes são estatisticamente significantes em um nível de 1% de significância. Os testes qui-quadrado, χ^2 , verificam se a frequência dos valores observados de TE-CRS se desvia significativamente, ou não, da frequência com que ele é esperado. São testadas as seguintes hipóteses: *i*) hipótese nula: as frequências observadas de TE-CRS são diferentes das esperadas, ou seja, as frequências observadas e esperadas de TE-CRS são independentes; e *ii*) hipótese alternativa: as frequências observadas de TE-CRS não são diferentes das frequências esperadas, ou seja, as frequências observadas e esperadas de TE-CRS são dependentes.

De acordo com os valores p da estatística χ^2 , de ambos os modelos, a hipótese nula é rejeitada, indicando a existência de dependência entre as frequências observadas de TE-CRS e as frequências esperadas de TE-CRS. Observa-se ainda que os *inputs* CCL e UV têm uma relação direta com a variável TE-CRS. Isso significa dizer que qualquer aumento no valor destes *inputs* gera um aumento da eficiência técnica. Analisando o sentido da correlação do *input* UV, é razoável afirmar que a alocação do fator de produção vagão está diretamente relacionada à produção de transportes, ou seja, quanto mais vagão.dia é empregado na operação, mais carga é transportada. Em relação ao insumo CCL, pode-se afirmar que a quantidade de combustível consumido pelas locomotivas – utilizadas nas operações de transporte, serviço e manobra – está diretamente relacionada à produção de transporte, uma vez que, para a locomotiva desenvolver esforço de tração, é necessária a queima de *diesel*. Já os *inputs* NTF, UL e NF possuem uma relação inversa com a variável TE-VRS, ou seja, um aumento no valor dessas variáveis gera uma redução da eficiência técnica. Observado o sentido da correlação de NTF e UL, pode-se afirmar que uma ferrovia a qual opera com muitos trens, empregados e, conseqüentemente, mais locomotivas, tende a ser menos eficiente que ferrovias as quais operam com um menor número de trens formados. Essa afirmação pode ser reforçada quando analisamos as ferrovias que transportam essencialmente minério de ferro e grãos agrícolas (soja e milho). O transporte dessas *commodities* envolve um número menor de trens, porém com mais vagões, quando comparado com a movimentação de outros tipos de carga que envolva trens menores em maior quantidade. Como a consolidação dos trens de minério e grãos agrícolas é mais simples e o número de trens formados é menor, infere-se que o quadro de empregados nas ferrovias tende a ser menor. Em 2011, 98% do transporte ferroviário de minério de ferro foi realizado pelas concessionárias EFC, MRS e EFVM, sendo que o minério de ferro

representou, respectivamente, 95%, 84% e 90% da movimentação total de carga, em toneladas úteis, dessas ferrovias. Os escores médios das eficiências técnicas para as DMUs da EFC, da MRS e da EFVM, foram 0,780 para TE-CRS e 0,843 para TE-VRS. Em relação ao transporte de *commodities* agrícolas, a ALLMN-RMN e a EFPO transportaram 40% do total de soja e milho movimentado nas ferrovias brasileiras em 2011. Essas duas *commodities* agrícolas representam, respectivamente, 78% e 75% da movimentação total de carga, em toneladas úteis, dessas ferrovias. Os escores médios das eficiências técnicas TE-CRS e TE-VRS para as DMUs da ALLMN-RMN e da EFPO foram, respectivamente, 0,807 e 0,893.

Esses dois cenários mercadológicos apresentados são bastante distintos do cenário das ferrovias ALLMO-RMO, ALLMP-RMP, ALLMS-RMS, FCA, FTC e FTL. Os segmentos de mercados atendidos por essas concessionárias são bastante diversificados, não havendo a especialização no transporte de produtos de um segmento de mercado. Os escores médios das eficiências técnicas TE-CRS e TE-VRS para essas DMUs foram, respectivamente, 0,251 e 0,258.

Os resultados apresentados indicam que as ferrovias que atuam quase exclusivamente no transporte de minério de ferro, soja e milho, são relativamente mais eficientes do que ferrovias que atuam em mercados mais pulverizados. Essa diferença está associada, principalmente, à gestão dos trens e dos funcionários. O transporte de *commodities* abrange operações mais frequentes e com maior previsibilidade, além de envolver um menor número de trens formados, porém maiores, ou seja, com mais vagões. Por seu turno, o transporte de carga geral e containerizada envolve uma gestão operacional mais complexa e com mais empregados, na medida em que há mais atores envolvidos na consolidação da carga, formação dos trens e realização de manobras.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a eficiência produtiva de onze concessionárias do sistema ferroviário brasileiro de carga no período de 2006 a 2011. Utilizou-se a análise envoltória de dados para calcular as medidas dessa eficiência, comumente conhecida como eficiência técnica, considerando retornos constantes e variáveis à escala. Após obtenção das eficiências, investigou-se em que medidas os parâmetros utilizados na produção de transporte influenciam na eficiência produtiva. Nesse contexto, as evidências empíricas dos modelos DEA mostram 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 grãos líquidos. As ferrovias EFC, MRS e EFVM, que atuam no transporte de minério de ferro, e as ferrovias EFPO e ALLMN-RMN, que atendem o setor de exportação de soja e milho, são mais eficientes, do ponto

de vista da produção de transportes, do que as ferrovias ALLMS-RMS, ALLMO-RMO, ALLMP-RMP, FTC, FCA e FTL, que operam com uma quantidade mais diversificada de produtos. Os modelos de regressão Tobit mostram que todas as variáveis utilizadas como *inputs* na modelagem DEA: *i*) número de trens formados; *ii*) consumo de combustível; *iii*) utilização de locomotiva; *iv*) utilização de vagão; e *v*) número de empregados, possuem correlação significativa com as eficiências produtivas. Interpretando os sentidos das correlações, pode-se inferir que a gestão de pessoal e operacional são matérias significantes no desempenho das ferrovias de carga. A análise conjunta dos resultados dos modelos DEA e das regressões Tobit revela dois cenários distintos para o sistema ferroviário brasileiro de carga. No primeiro, temos as ferrovias *especialistas* com patamares elevados de eficiência produtiva e que atendem exclusivamente aos setores de exportação de minério de ferro e de soja e milho em grão. Essas ferrovias operam com um número menor de trens e funcionários em relação à TKU produzida e, conseqüentemente, com trens maiores, operação verticalizada, atendimento a uma pequena carteira de clientes e transporte de mercadorias com escala e de fácil consolidação.

A literatura dos modelos DEA aplicada a transportes ferroviários é resumida em Azambuja (2002) e corrobora o encontrado neste artigo. Silva *et al.* (2010) também apresentam resultados no mesmo sentido. Entretanto, havia uma lacuna quanto à aplicação de modelos Tobit para verificação da significância dos insumos na determinação da eficiência de concessionárias ferroviárias. Desta feita, este trabalho avança aplicando um modelo paramétrico, já empregado na literatura internacional, para verificar os resultados de um modelo DEA estatisticamente, bem como contribui cientificamente para os estudos nacionais, uma vez que aplica procedimentos de *bootstrap* para diminuir viés de estimação, como sugerido por Koster, Balk e Van Nus (2009) e Simar e Wilson (1998).

No segundo cenário, temos as ferrovias com baixos níveis de eficiência produtiva e que operam com um maior número de trens e de funcionários em relação à TKU produzida. Essas ferrovias atendem a vários nichos de mercado e, em conseqüência, possuem muitos clientes, o que dificulta a consolidação das cargas. Cabe ressaltar que o Brasil é um país preponderantemente exportador de matérias-primas e seus segmentos de exportação de *commodities* são favorecidos pelo direcionamento dos recursos para atendê-los. A exploração dessas *commodities* só é viável se o transporte, que é um dos principais componentes da cadeia de produção, for eficiente, dado o baixo valor agregado desses produtos. Assim, será oportuno avaliar em estudos futuros o desempenho da geração de receita proveniente da produção de transporte nas ferrovias, pois transportar um vagão de minério de ferro, soja ou milho pode ser bem menos lucrativo que transportar um contêiner.

Alguns autores sugerem que pode haver sazonalidade nos dados de transporte ferroviário para a estimação feita e que o método de análise envoltória de dados seja aplicado separadamente para cada um dos períodos sazonais. Seria razoável fazer modelos por período sazonal, meses ou safra, contudo, tal exercício seria laborioso e não se sabe se assertivo. Optou-se por fazer uma análise com variáveis dummies para modelo Tobit e não se verificou grandes mudanças nos resultados do modelo sem as variáveis *dummies*, portanto, manteve-se o modelo sem correção de sazonalidade. De qualquer forma, sugere-se uma investigação de métodos de correção de sazonalidade para trabalhos semelhantes a este.

REFERÊNCIAS

AMEMIYA, T. Regression analysis when the dependent variable is truncated normal. **Econometrica**, v. 41, n. 6, p. 997-1016, 1973.

_____. Tobit models: a survey. **Journal of Econometrics**, v. 24, n. 1-2, p. 3-61, 1984.

_____. **Advanced Econometrics**. Oxford: Basil Blackwell, 1985.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Resolução ANTT nº 3.694/2011. Aprova o Regulamento dos usuários dos serviços de transporte ferroviário de cargas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2011a. Disponível em: <<https://bit.ly/2oSrUo6>>.

_____. Resolução ANTT nº 3.695/2011. Aprova o Regulamento das operações de direito de passagem e tráfego mútuo, visando à integração do sistema ferroviário nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 20 jul. 2011b. Disponível em: <<https://bit.ly/33rnuU8>>.

_____. **Sistema de Acompanhamento de Fretes Ferroviários (Saff)**. Brasília: ANTT, 2012.

_____. **Concessões ferroviárias**, 2013a. Disponível em: <<https://bit.ly/2rcE7Vp>>.

_____. **Manual do sistema de acompanhamento e fiscalização do transporte ferroviário**. Brasília: ANTT, 2013b.

ASMILD, M. *et al.* Railway reforms: do they influence operating efficiency? **Discussion Papers**, University of Copenhagen, n. 8-5, 2008. 28p.

AZAMBUJA, A. M. V. **Análise de eficiência na gestão do transporte urbano por ônibus em municípios brasileiros**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BANKER, R.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Manage Sci.**, n. 30, p. 1078-1092, 1984.

BANKER, R. D.; THRALL, R. M. Estimation of returns to scale using data envelopment analysis. **Eur J OperRes.**, n. 62, p. 74-84, 1994.

BHANOT, N.; SINGH, H. Benchmarking the performance indicators of Indian Railway container business using data envelopment analysis. **Benchmarking: An International Journal**, v. 21, n. 1, p. 101-120, 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/36DYFXn>>.

BOGETOFT, P.; OTTO, L.; **Benchmarking with DEA, SFA, and R**. New York: Springer, 2011.

BRASIL. Decreto nº 1.832/1996. Aprova o regulamento dos transportes ferroviários. **Planalto.gov**, Brasília, 4 mar. 1996. Disponível em: <<https://bit.ly/33rLCWX>>.

BURI, M. R. *et al.* Transporte ferroviário de cargas no Brasil – aproveitamento da malha. *In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 13., 2006, Bauru, São Paulo. **Anais...** Bauru: Simpep, 2006.

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: CLAIQ; SBPO, 2012.

CASE, K. E.; FAIR, R. C. **Principles of economics**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

CASTRO, N. Os desafios da regulação do setor de transporte no Brasil. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 5, set./nov., 2000. Mimeografado.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, p. 429-444, 1978.

CHENG, Y.-H. High-speed rail in Taiwan: new experience and issues for future development. **Transport Policy**, v. 17, n. 2, p. 51-63, 2010.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **O sistema ferroviário brasileiro**. Brasília: CNT, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/33qXGn>>.

COELLI, T.; PERELMAN, S. Technical efficiency of european railways: a distance function approach. **Applied Economics**, n. 32, p. 1967-1976, 2000.

COELLI, T.; PRASADA RAO, D. S.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Boston; Dordrecht; London: Kluwer Academic Publishers, 1998.

DYSON, R. G. Performance measurement and data envelopment analysis – ranking are ranks! **OR Insight**, v. 13, n. 4, p. 3-8, 2001.

ERKOC, T. E. Estimation methodology of economic efficiency: stochastic frontier analysis vs data envelopment analysis. **International Journal of Academic Research in Economics and Management Sciences**, v. 1, n. 1, Jan. 2012. Disponível em: <<https://bit.ly/2PVd4Z6>>.

FRIEBEL, G.; IVALDI, M.; VIBES, C. Railway (de)regulation: a european efficiency comparison. **CEPR Discussion Paper**, n. 4319, London, 2005. 47 p.

KOSTER, M. B. M.; BALK, B. M.; VAN NUS, W. T. I. On using DEA for benchmarking container terminals. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 29, p. 1140-1155, 2009.

KUTLAR, A.; ALI 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 Journal**, v. 47, n. 6, p. 3575-3602, 2013.

LAN, L. W.; LIN, E. T. J. Technical efficiency and service effectiveness for railways industry: DEA approaches. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 5, Oct. 2003.

LANG, A. **As ferrovias no Brasil e avaliação econômica de projetos: uma aplicação em projetos ferroviários**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <<https://bit.ly/32vJaNX>>.

LANSINK, A. O.; SILVA, E.; STEFANOU, S. Inter-firm and intra-firm efficiency measures. **Journal of Productivity Analysis**, v. 15, p. 185-199, 2001.

LI, L. B.; HU, J. L. Efficiency analysis of the regional railway in China: An application of DEA-Tobit approach. **Journal of Information and Optimization Sciences**, v. 31, n. 5, p. 1071-1085, 2010.

MACAMBIRA FILHO, J. K. D. **Mensuração de eficiência produtiva das ferrovias brasileiras de carga: uma aplicação de modelos DEA e Tobit**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014, 97p.

MALHOTRA, R.; MALHOTRA, D. K.; LERMACK, H. Using data envelopment analysis to analyze the performance of North American class I freight railroads; Applications of Management Science. *In*: LAWRENCE, K. D.; KLEINMAN, G.

(Eds.) **Financial modeling applications and data envelopment applications**. [s.l.]: Emerald Group Publishing Limited, 2009. v. 13. p. 113-131.

MERKERT, R.; SMITH, A.; NASH, C. The effects of institutional, environmental and transactional factors on train operating company performance? A Tobit regression approach based on DEA efficiency scores. *In*: EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE, 2009, Conference Centre Leeuwenhorst. **Anais...** Disponível em: <<https://bit.ly/2CsL6vH>>.

NAG, B. **Comparison of efficiency of Indian railways with world railways and across time using data envelopment analysis technique**. Calcutá: IIMC, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2O2m4t5>>.

PAVLYUK, D. Efficiency analysis of european countries railways. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE: RELIABILITY AND STATISTICS IN TRANSPORTATION AND COMMUNICATION, 8., Riga, 2008. **Anais...** Riga: International Conference, 2008.

PETROVIC, M. *et al.* A DEA based approach for cross-country evaluation of rail freight transport: possibilities and limitations. **Machines, Technologies, Materials Virtual Journal**, v. 22, n. 5, 2012.

SAMENI, M. K.; PRESTON, J. M. Value for rail capacity. Assessing efficiency of operators in Great Britain. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, n. 2289, p. 134-144, 2012.

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

SCHNEDLER, W. Likelihood estimation for censored random vectors. **Econometric Reviews**, v. 24, n. 2, p. 195-217, 2005.

SILVA, F. G. F. *et al.* **Um estudo exploratório da eficiência produtiva de concessionárias de transporte ferroviário de carga no Brasil**. Salvador: Anpet, 2010.

SIMAR, L.; WILSON, P. W. Sensitivity analysis of efficiency scores: how to bootstrap in nonparametric frontier models. **Management Science**, v. 44, n. 1, p. 49-61, 1998.

_____. Estimating and bootstrapping Malmquist indices. **European Journal of Operational Research**, v. 115, n. 3, p. 459-471, 1999.

_____. A general methodology for bootstrapping in nonparametric frontier models. **Journal of Applied Statistics**, v. 27, n. 6, p. 779-802, 2000.

_____. Non-parametric tests of returns to scale. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 1, p. 115-132, 2002.

_____. Inference by the m out of n bootstrap in nonparametric frontier models. **Journal of Productivity Analysis**, v. 36, p.33-53, 2011.

SILVEIRA, M. R. **A importância geoeconômica das estradas de ferro no Brasil**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2003.

_____. **Estradas de ferro no Brasil**: das primeiras construções às parcerias público-privadas. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007. 204p.

TAVARES, M. P. **Concessões ferroviárias de carga**: proposta de monitoração dos ativos operacionais arrendados. 2003. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.

THANASSOULIS, E. **Introduction to theory and application of data envelopment analysis**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2001.

TOBIN, J. Estimation of relationships for limited dependent variables. **Econometrica**, v. 26, n. 1. p. 24-36, Jan. 1958.

TSAI, C. H.; MULLEY, C.; MERKERT, R. Measuring the cost efficiency of urban rail systems: an international comparison using DEA and Tobit Models. **Journal of Transport Economics and Policy**, v. 49, n. 1, 2014.

WETZEL, H. European railway deregulation: the influence of regulatory and environmental conditions on efficiency. **Working Paper Series in Economics**, n. 86, p. 36, 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/2JX8A0e>>.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BRASIL. Lei nº 2.975/1956. Altera a legislação do imposto único sobre combustíveis e lubrificantes líquidos e gasosos, e dá outras providências. **Planalto.gov**, Rio de Janeiro, 27 nov. 1956. Disponível em: <<https://bit.ly/33qm5NV>>.

_____. Lei nº 3.115/1957. Determina a transformação das empresas ferroviárias da União em sociedades por ações, autoriza a constituição da Rede Ferroviária S.A., e dá outras providências. **Planalto.gov**, Rio de Janeiro, 16 mar. 1957 Disponível em: <<https://bit.ly/34CStg9>>.

_____. Decreto nº 58.992/1966. Dispõe sobre a implementação da política governamental de supressão de trechos ferroviários antieconômicos de que trata a Lei nº 4.452 de 1964, de 5 de novembro de 1964. **Jusbrasil.com.br**, 4 ago. 1966. Disponível em: <<https://bit.ly/36E2qvX>>.

_____. Decreto-Lei nº 89.396/1984. Autoriza a Rede Ferroviária Federal S.A. – RFFSA a, mantida a condição de subsidiária, mudar a denominação e objeto social da Empresa de Engenharia Ferroviária S.A. – ENGEFER e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 22 fev. 1984. Seção 1. Disponível em: <<https://bit.ly/2NrnjTk>>.

_____. Decreto-Lei nº 473/1992. Dispõe sobre inclusão, no Programa Nacional de Desestatização - PND, da Rede Ferroviária Federal S.A. – RFFSA, da AGEF – Rede Federal de Armazéns Gerais Ferroviários S.A. e da VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. **Planalto.gov**, Brasília, 10 mar. 1992. Disponível em: <<https://bit.ly/2JWUZ96>>.

_____. Decreto nº 8.134/2013. Estrutura a Valec - Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. para a execução das atividades de desenvolvimento dos sistemas de transporte ferroviário e aprova o Estatuto Social da empresa. **Planalto.gov**, Brasília, 28 out. 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2qz1SqE>>.

BRASILEIRO, A. **Transportes no Brasil: história e reflexões**. Brasília; Recife: GEIPOT; Editora UFPE, 2001.

CALDEIRA, J. **Mauá: empresário do império**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. Programming with linear fractional functionals. **Naval Research Logistics Quarterly**, n. 9, p. 181-185, 1962.

CRUZ, I. **Gestão ambiental da operação do transporte ferroviário de carga**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://bit.ly/32q08Np>>.

DEBREU, G. The coefficient of resource utilization. **Econometrica**, v. 19, p. 273-292, 1951.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, n. 120, p. 253-281, 1957.

FONTELLES, C. B.; FROES, M. F. V. A privatização da atividade ferroviária no Brasil. *In*: CONGRESO PANAMERICANO DE FERROCARRILES, 20., 2000, Havana. **Anais...** Havana: Congreso Panamericano de Ferrocarriles, 2000.

HICKS, J. R. A suggestion for simplifying the theory of money. **Economica**, n. 2, p. 1-19, 1935.

LEIBENSTEIN, H. Allocative efficiency vs “x-efficiency”. **The American Economic Review**, v. 56, n. 3, p. 392-415, Jun. 1966.

MARCHETTI, D.; WANKE, P. Brazil’s rail freight transport: Efficiency analysis using two-stage DEA and cluster-driven public policies. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 59, p. 26-42, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2oW5Ust>>.

MCCULLOUGH, G. J. US railroad efficiency: a brief economic overview. **Transportation Research Board**, 2007 Disponível em: <<https://bit.ly/36HlwRz>>.

MELO, A. L. O. **Classificação e identificação de trechos ferroviários concedidos passíveis de devolução ao poder concedente: uma proposta metodológica.** 2012. Monografia (Especialização) – Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MERKERT, R.; SMITH, A. S. J.; NASH, C. A. Efficiency analysis of the regional railway in China: an application of DEA-Tobit approach. **Transportation Planning and Technology**, v. 33, n. 1, p. 35-53, 2010.

MICHAELIS. **Dicionário da Língua Portuguesa**, 2012.

NASH, C. A.; TONER, J. P. **Railways: structure, regulation and competition policy.** [s.l.]: OECD, 1997. Disponível em: <<https://bit.ly/34CbJKQ>>.

PAULA, D. A. **As ferrovias no Brasil: análise do processo de erradicação de ramais.** Paraná: Unioeste, 2000. Disponível em: <<https://bit.ly/2NN5tt3>>.

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

SOUSA, R. A.; PRATES, H. F. O processo de desestatização da RFFSA: principais aspectos e primeiros resultados. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 8, p. 119-142, dez. 1997. Disponível em: <<https://bit.ly/2pPU97p>>.

TSEKERIS, T. Greek airports: efficiency measurement and analysis of determinants. **Journal of Air Transport Management**, v. 17, p. 140-142, 2011.

VARIAN, H. R. **Microeconomic analysis.** 3. ed. New York; London: W.W. Norton, 1992.

WANKE, P.; BARROS, C. P. Slacks determinants in Brazilian railways: a distance friction minimization approach with fixed factors. **Applied Economics**, v. 47, p. 5103-5120, 2015.

ZHU, J. **Quantitative models for performance evaluation and benchmarking: data envelopment analysis with spreadsheets and DEA excel solver.** Boston: Kluwer, 2003a.

_____. **Quantitative models for performance evaluation and benchmarking: data envelopment analysis with spreadsheets.** 2. ed. Boston: Springer Science, 2003b.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação

Reginaldo da Silva Domingos

Assistente de Coordenação

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

Supervisão

Camilla de Miranda Mariath Gomes

Everson da Silva Moura

Revisão

Alice Souza Lopes

Ana Clara Escórcio Xavier

Clícia Silveira Rodrigues

Idalina Barbara de Castro

Luiz Gustavo Campos de Araújo Souza

Olavo Mesquita de Carvalho

Regina Marta de Aguiar

Amanda Ramos Marques (estagiária)

Ana Luíza Araújo Aguiar (estagiária)

Hellen Pereira de Oliveira Fonseca (estagiária)

Ingrid Verena Sampaio Cerqueira Sodré (estagiária)

Isabella Silva Queiroz da Cunha (estagiária)

Lauane Campos Souza (estagiária)

Editoração

Aeromilson Trajano de Mesquita

Bernar José Vieira

Cristiano Ferreira de Araújo

Danilo Leite de Macedo Tavares

Herlyson da Silva Souza

Jeovah Herculano Szervinsk Junior

Leonardo Hideki Higa

Capa

Luís Cláudio Cardoso da Silva

Projeto Gráfico

Renato Rodrigues Bueno

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Livraria Ipea

SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo

70076-900 – Brasília – DF

Tel.: (61) 2026-5336

Correio eletrônico: livraria@ipea.gov.br

