

Ecoeficiência das nações: a eficiência unificada sob disposições natural e gerencial^a

Eco-efficiency of the Nations: Unified Efficiency under Natural and Management Disposability

Gabriel Teixeira Ervilha^b 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Economia, Viçosa, Brasil

Wilson da Cruz Vieira^c 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Economia Rural, Viçosa, Brasil

Elaine Aparecida Fernandes^d 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Economia, Viçosa, Brasil

Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar, por meio da análise envoltória de dados e suas extensões, a eficiência dos países, considerando, de forma unificada, duas condições fundamentais para um desenvolvimento contínuo e sustentável: a eficiência produtiva (produção de bens e serviços) e a eficiência ambiental (mitigação das emissões de CO₂ equivalente). Ademais, utilizou-se os conceitos de disposição natural e disposição gerencial. Os resultados indicaram não haver relação entre nível de desenvolvimento econômico e eficiência unificada e que o fator escala tem um papel relevante quando se trata de ecoeficiência, principalmente nas nações mais ricas e mais poluidoras. As análises indicaram, ainda, a possibilidade de reduções consideráveis nas emissões de gases poluidores caso os países fossem projetados para a fronteira de eficiência. Se essa projeção ocorrer por meio de desenvolvimento de ecotecnologias, base da modelagem sob disposição gerencial, pode-se garantir retornos substanciais e consistentes no longo prazo, permitindo, inclusive, metas audaciosas de redução das emissões de gases do efeito estufa,

Editora responsável: Ana Lúcia Tatsch

^a Submissão: 08/02/2021 | Aprovação: 26/09/2022 | DOI: 10.22456/2176-5456.111354

^b gabriel.ervilha@ufv.br

^c wwieira@ufv.br

^d eafernandes@ufv.br

Todos os autores foram responsáveis pela concepção, pesquisa de dados e/ou documentos, análise dos dados e/ou documentos, participação ativa na discussão dos resultados e revisão e aprovação da versão final.



Esta publicação está licenciada sob os termos de
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

necessárias à realidade climática. Dessa forma, dada sua importância, sugere-se que indicadores de eficiência possam ser utilizados na proposição de políticas globais de metas para a mitigação das emissões de gases danosos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Análise envoltória de dados. Disposição gerencial. Disposição natural. Sustentabilidade ambiental. Ecotecnologias.

Abstract: The objective of this paper is to evaluate, through data envelopment analysis and its extensions, the efficiency of the countries, considering, in a unified way, two fundamental conditions for a continuous and sustainable development: the productive efficiency (production of goods and services) and environmental efficiency (mitigation of CO₂ equivalent emissions). In addition, the concepts of natural disposability and managerial disposability were used. The results indicated that there is no relationship between the level of economic development and unified efficiency and that the scale factor has a relevant role when it comes to eco-efficiency, especially in the wealthiest and most polluting nations. The analyzes also indicated the possibility of considerable reductions in polluting gas emissions if countries were projected to the efficiency frontier. If this projection occurs through the development of ecotechnologies, the basis of modeling under managerial disposability, it can guarantee substantial and consistent returns in the long-term, allowing for audacious goals to reduce greenhouse gas emissions, necessary for the climate reality. Thus, given its importance, it is suggested that efficiency indicators can be used in the proposal of global policies for gases emissions mitigation harmful to the environment.

Keywords: Data Envelopment Analysis. Natural Disposability. Managerial Disposability. Sustainability. Ecotechnologies.

JEL: C61. Q56.

1. Introdução

A análise de eficiência tem importância fundamental na avaliação do desempenho produtivo e ambiental, principalmente a partir da separação dos produtos (*outputs*) em resultados desejáveis (*goods*) e indesejáveis (*bads*) (Korhonen; Luptacik, 2004; Zaim, 2004; Kumar, 2006; Sueyoshi; Goto, 2010a; Podinovski; Kousmanen, 2011). Essa relação entre eficiência, produção e meio ambiente cunhou a terminologia de ecoeficiência produtiva.

Na verdade, o conceito de ecoeficiência produtiva surgiu do interesse de buscar uma produção de bens e serviços que atenda ao mercado, causando a menor degradação ambiental possível (Kuosmanen; Kortelainen, 2005). Diante dos avanços nos debates acerca das questões climáticas, tal conceito tornou-se evidente nos meios público, privado e, conseqüentemente, acadêmico, influenciando decisões relacionadas a fatores legais, tecnológicos, mercadológicos e financeiros.

Nesse ínterim, é necessário identificar o nível de ecoeficiência das nações, ou seja, verificar se as eficiências produtiva e ambiental podem se desenvolver conjuntamente, garantindo crescimento econômico e sustentabilidade ambiental.

A ecoeficiência dos países e/ou setores econômicos já foi avaliada em diferentes estruturas e para distintos objetos de estudo (Zhou; Ang; Poh, 2008; Sueyoshi; Goto, 2010a; Zhang *et al.*, 2011; Camiato *et al.*, 2016; Hatfield-Dodds *et al.*, 2017).¹ O setor energético é um dos mais representados nos estudos de ecoeficiência, destacando-se os trabalhos Korhonen e Luptacik (2004) para a Europa; Zhang e Choi (2013) para a China; Sueyoshi e Goto (2011b) para o Japão; e Sueyoshi e Goto (2009; 2010b; 2011a), Sueyoshi, Goto e Shang (2009) e Sueyoshi, Goto e Ueno (2010) na mensuração da eficiência ambiental e operacional das usinas de energia dos Estados Unidos.

As pesquisas de Sueyoshi e Goto (2009; 2010b; 2011a; 2011b), relacionadas aos setores de energia japonês e norte-americano, foram fundamentais para o desenvolvimento da estrutura computacional para a avaliação ambiental em análise envoltória de dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA). Contudo, a discussão

¹ Para revisões detalhadas sobre a literatura que relaciona eficiência e meio ambiente e as aplicações da análise envoltória de dados em meio ambiente, consultar Caiado *et al.* (2017); Mardani *et al.* (2017; 2018); Sueyoshi, Yuan e Goto (2017); Sueyoshi e Goto (2018); e Zhou, Ang e Poh (2018).

conceitual acerca da disposição natural e gerencial²³ foi apresentada em Sueyoshi e Goto (2012a), onde aplicaram a eficiência unificada (operacional e ambiental) para comparar o desempenho das empresas petrolíferas públicas com o das empresas privadas de petróleo. A partir desse estudo, desenvolveram-se diversos outros (Sueyoshi; Goto, 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2015; Goto; Otsuka; Sueyoshi, 2014; Sueyoshi; Li; Gao, 2018).

Apesar do avanço das pesquisas acerca da mensuração da ecoeficiência, ainda não há trabalhos que envolvam uma análise global de eficiência unificada (operacional e ambiental), considerando diferentes países e diferentes estruturas produtivas. Sendo assim, este estudo contribui para a literatura ao propor como objetivo a avaliação da eficiência dos países, considerando, conjuntamente, duas condições fundamentais para um desenvolvimento contínuo e sustentável: a eficiência produtiva, mensurada pela produção de bens e serviços, e a eficiência ambiental, baseada nas emissões de gases do efeito estufa (CO₂ equivalente). Enquanto a primeira busca maximizar a produção para dada quantidade de fatores produtivos, a segunda visa reduzir o impacto da utilização desses fatores no meio ambiente, minimizando as emissões de gases do efeito estufa (GEE).⁴

Especificamente, pretende-se, através da técnica DEA e suas extensões, analisar diferentes indicadores de eficiência técnica (operacional e ambiental) e de escala (retornos e danos) para o ano de 2014.⁵

² As definições de disposição natural e disposição gerencial, desenvolvidas por Sueyoshi e Goto (2012a), são as bases das análises de eficiência desenvolvidas neste trabalho. Na disposição natural, a eliminação de fontes de ineficiências operacionais é definida como prioridade e o desempenho ambiental é medido como objetivo secundário. Já a disposição gerencial tem prioridade oposta nas medidas de desempenho operacional e ambiental. Os demais conceitos fundamentais ao estudo relacionam-se diretamente aos conceitos de disposição natural e disposição gerencial, referindo-se aos efeitos de escala (retornos e danos), que serão adequadamente definidos na Seção 2.

³ Conceitos originalmente definidos como *natural disposability* e *managerial disposability*, respectivamente. Na tradução livre, optou-se por utilizar o termo “disposição” (ato ou efeito de dispor). Contudo, é possível encontrar na literatura em português traduções como: descartabilidade e disponibilidade, ou o uso do próprio termo em inglês.

⁴ Em outras palavras, busca-se, por meio da análise de ecoeficiência, maximizar o nível de eficiência operacional para o sucesso econômico dos países avaliados e, simultaneamente, minimizar o nível de poluição ambiental, atingindo-se um equilíbrio e, consequentemente, um maior nível de sustentabilidade.

⁵ Os autores compreendem que a defasagem da base de dados limita o debate acerca do processo de mudanças climáticas, tão contemporâneo e dinâmico, principalmente pelos eventos recentes, como o Acordo de Paris, os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a pandemia da Covid-19, entre outros fatores relevantes à discussão das mudanças climáticas. Contudo, as bases de dados fornecidas pelo Banco Mundial (*DataBank*), apesar da disponibilidade de dados mais recentes, apresentam ausências e inconsistências substanciais de dados fundamentais ao proposto nesta pesquisa, justificando a utilização dos dados consolidados de 2014, que conseguem trazer importantes resultados para o debate ambiental.

Ressalta-se que a contribuição desta pesquisa para a literatura conexa perpassa a realização de uma análise global de eficiência, sendo a amplitude desta análise (109 países⁶), a definição dos insumos e produtos, o período de análise, o tratamento dos dados, a construção dos modelos de programação matemática em linguagem GAMS⁷ e os diferentes cenários metodológicos, pontos de destaque que respaldam a importância e originalidade da pesquisa.

Além desta introdução, o artigo está estruturado em mais quatro seções: na seção 2 são apresentados aspectos teóricos e empíricos acerca da eficiência ambiental; em seguida, na seção 3, encontram-se as principais ferramentas metodológicas utilizadas na análise, assim como os dados e variáveis utilizados. Os resultados e discussão estão na seção 4 e, finalmente, na seção 5, apresentam-se as principais conclusões do trabalho.

2. Aspectos teóricos e empíricos da ecoeficiência

2.1 Unificação radial entre produtos desejáveis e indesejáveis

A avaliação da ecoeficiência em diferentes objetos de estudo tem implicações importantes na formulação de políticas e na promoção da sustentabilidade. Dessa forma, ao longo dos anos, diferentes modelos de eficiência buscaram relacionar processos produtivos e resultados ambientais.

Um dos ganhos metodológicos na literatura recente do DEA ambiental foi a mensuração da eficiência unificada de resultados desejáveis (operacionais) e indesejáveis (danos ambientais) (Sueyoshi; Goto, 2012a). Dessa forma, compreender esse processo de unificação radial entre saídas desejáveis e indesejáveis é fundamental na compreensão dos modelos propostos.

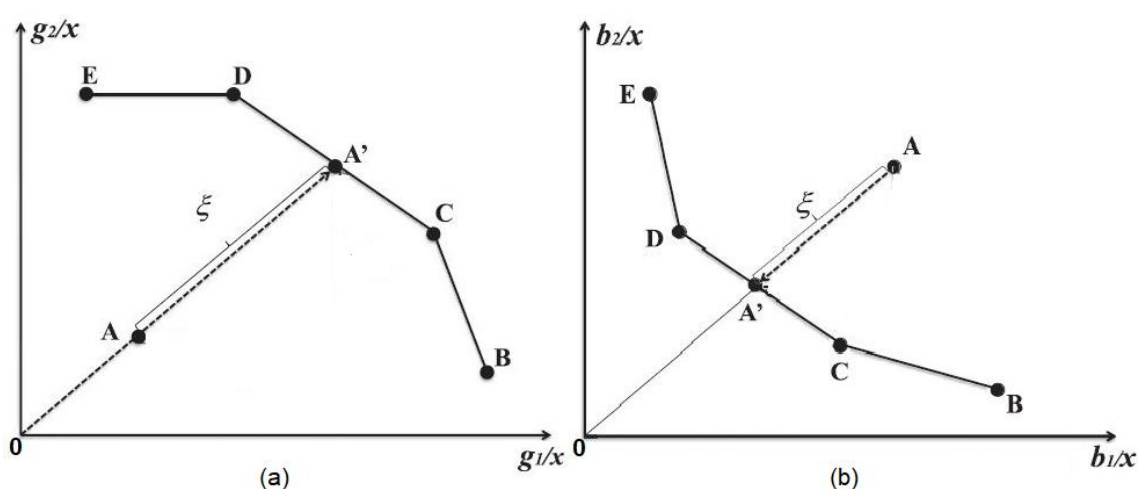
Uma importante análise para o entendimento desse processo é apresentada por Sueyoshi e Yuan (2017), conforme ilustrado na Figura 1. A Figura 1a considera que cinco unidades tomadoras de decisão (*decision making units* - DMUs) (A, B, C, D, E) utilizam-se de um único insumo (x) na obtenção de dois produtos desejáveis (g_1 e g_2), assumindo que todas as DMUs produzem a mesma quantidade de uma saída indesejável (b). Já a Figura 1b considera a presença de dois produtos indesejáveis (b_1 e b_2) e pressupõe que todas as cinco DMUs produzem a mesma

⁶ O número de países analisados refere-se à disponibilidade de dados na base do Banco Mundial (*DataBank*). Inconsistências identificadas na base de dados também foram consideradas na seleção da amostra.

⁷ *General Algebraic Modeling System*.

quantidade de uma única saída desejável (g). Os eixos dos gráficos são as produtividades do insumo x na geração de produtos desejáveis (1a) e de produtos indesejáveis (1b). O contorno B-C-D-E é a fronteira de eficiência em ambas as figuras. A DMU A é considerada ineficiente, tendo uma projeção radial para a fronteira eficiente em A' .

Figura 1 - Projeções na fronteira de eficiência para (a) saídas desejáveis e (b) saídas indesejáveis



Fonte: adaptado de Sueyoshi e Yuan (2017).

Ao considerar a medição de distância radial, a razão $(OA)/(OA')$, na Figura 1a, indica a magnitude da eficiência referente à DMU A . Assim:

$$\begin{aligned} \frac{OA}{OA'} &= \frac{OA}{OA + AA'} = \frac{1}{1 + \frac{AA'}{OA}} \cong \frac{1}{1 + \frac{AA'}{OA'}} = \frac{1}{1 + \xi} = 1 - \xi + \xi^2 - \xi^3 + \dots \\ &\cong 1 - \xi \end{aligned} \quad (01)^{89}$$

⁸ A equação (01) considera que a DMU A se localiza próxima a A' , de modo que o OA pode ser substituído por OA' . Em outras palavras, se uma DMU se localiza em uma fronteira de eficiência ou próxima a ela, a medida da razão é confiável. Por outro lado, se a DMU se localizar longe da fronteira de eficiência, a medida da razão pode se aproximar de um (Sueyoshi; Goto, 2014). A razão $AA'/OA' = \xi$, que é o grau de ineficiência unificada, indica a magnitude do vetor direcional de A para melhorar o desempenho operacional da DMU A .

⁹ É considerada uma aproximação matemática em que $\sum_{w=2}^{\infty} (-\xi)^w = \xi^2/1 + \xi \cong 0$, se $\xi \leq 1$.

Já na Figura 1b a projeção da DMU A no caso de duas saídas indesejáveis para a fronteira eficiente ocorre de forma direta. A relação OA'/OA indica o grau de eficiência de A , ou seja:

$$\frac{OA'}{OA} = \frac{OA - AA'}{OA} = 1 - \frac{AA'}{OA} = 1 - \xi \quad (02)$$

Assim, é possível unificar os resultados desejáveis e indesejáveis e medir a magnitude da eficiência unificada em $1 - \xi$.

2.2 Disposição natural e disposição gerencial

Para analisar a eficiência unificada das nações e verificar os avanços da sustentabilidade ambiental, este trabalho incorpora os conceitos de disposição natural e disposição gerencial, propostos por Sueyoshi e Goto (2012a)¹⁰. Resumidamente, na disposição natural o desempenho operacional é medido como prioridade e o desempenho ambiental é medido como objetivo secundário; já a disposição gerencial tem prioridade oposta nas medidas de desempenho operacional e ambiental.

A disposição natural implica uma estratégia ambiental pela qual uma DMU tenta diminuir o vetor de entrada para reduzir o vetor de saídas indesejáveis. Diante da redução no volume de insumos, a DMU tenta aumentar tanto quanto possível o vetor de resultados desejáveis (*outputs*) (Sueyoshi; Goto, 2012a).

Já a disposição gerencial indica uma estratégia ambiental oposta, na qual a DMU aumenta o vetor de entrada, mas tenta melhorar seu desempenho unificado utilizando uma nova tecnologia ambiental. Dessa forma, o aumento do vetor de insumos gera um aumento no vetor de saídas desejáveis e a diminuição no vetor de resultados indesejáveis, visto um avanço de ecotecnologia. A disposição gerencial implica uma estratégia adaptativa na qual o desempenho ambiental dos países é tão importante quanto seu desempenho operacional (Sueyoshi; Goto, 2012a).

¹⁰ Os conceitos de disposição natural e disposição gerencial apresentam semelhanças com os conceitos de disposição fraca (*weak disposability*) e disposição forte (*strong disposability*) (comumente utilizados na análise DEA) em termos de suas perspectivas conceituais e metodológicas. Para detalhes sobre tais relações, consultar Sueyoshi e Goto (2012f). Para outros detalhes sobre os conceitos de disposição fraca e disposição forte, consultar Ray (2004).

Juntamente com os conceitos de disposição natural e disposição gerencial, o conceito de medida de escala¹¹ na análise DEA também se modifica, pois o mesmo divide-se em retornos à escala (RTS), para modelos de disposição natural, e danos à escala (DTS), para modelos de disposição gerencial.

A medida de retornos à escala (ou economias de escala - RTS) fornece informações acerca das mudanças nos resultados desejados devido às mudanças na quantidade de insumos. O RTS crescente, sob disposição natural, implica que um aumento unitário nos insumos produz aumentos mais que proporcionais nos resultados desejáveis, sem agravar os resultados indesejáveis. Já no caso de RTS decrescente, um aumento unitário nos insumos produz aumentos menos que proporcionais nos resultados desejáveis e com RTS constante tais aumentos são proporcionais, sem agravar os resultados indesejáveis (Sueyoshi; Goto, 2018).

Ao alterar a análise de produtos desejados para resultados indesejáveis – ou seja, analisar informações acerca das mudanças nos resultados indesejados devido a mudanças na quantidade de insumos – conceitua-se a medida de danos à escala (DTS). Um DTS crescente, sob disposição gerencial, implica que um aumento unitário de insumos produz aumentos mais que proporcionais nos resultados indesejáveis, sem melhorar os produtos desejáveis. Já no caso de DTS decrescente, um aumento unitário nos insumos produz aumentos menos que proporcionais nos resultados indesejáveis e com DTS constante tais aumentos são proporcionais, sem alterar os produtos desejáveis (Sueyoshi; Goto, 2018).

Dessa forma, embora o RTS e o DTS tenham semelhanças matemáticas, suas implicações econômicas são completamente opostas, pois um RTS crescente aponta maior oportunidade de produção a custos marginais decrescentes, enquanto um DTS crescente indica mais danos ao meio ambiente a taxas crescentes (Sueyoshi; Goto, 2012c). Contudo, cabe ressaltar a coexistência de DTS e RTS, pois o desempenho ambiental das DMUs não existe sem o desempenho operacional das mesmas.

¹¹ A medida de escala fornece informações tanto de mudanças nos resultados desejados devido a mudanças na quantidade de insumos, quanto da forma de uma fronteira de eficiência. Mais detalhes, consultar Banker *et al.* (2011).

3. Metodologia

3.1 A análise da eficiência unificada

Como já mencionado, a eficiência unificada pode ser separada em dois modelos DEA: sob disposição natural e sob disposição gerencial, combinando resultados desejáveis e indesejáveis com distintas prioridades. Apesar de arcabouços teóricos distintos, os dois modelos DEA apresentam estruturas matemáticas e computacionais semelhantes. Inicialmente apresenta-se o modelo DEA sob disposição natural.

Considerando que existam m insumos, s produtos desejáveis e h produtos indesejáveis para cada uma das n DMUs, a j -ésima DMU utiliza um conjunto de insumos (vetor de entrada X_j) para gerar um vetor de saídas desejáveis (G_j) e, indiretamente, um vetor de saídas indesejáveis (B_j).

O modelo DEA, apresentado por Sueyoshi e Goto (2012a; 2016; 2018), para mensurar a ineficiência unificada da k -ésima DMU sob disposição natural e retornos variáveis de escala é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[\sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\
 & \text{sujeito a:} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + d_i^{x-} = x_{ik} \quad (i = 1, \dots, m), \\
 & \sum_{j=1}^n g_{rj} \lambda_j - d_r^g - \xi g_{rk} = g_{rk} \quad (r = 1, \dots, s), \\
 & \sum_{j=1}^n b_{fj} \lambda_j + d_f^b + \xi b_{fk} = b_{fk} \quad (f = 1, \dots, h), \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\
 & \lambda_j \geq 0 \ (j = 1, \dots, n), d_i^{x-} \geq 0 \ (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 \ (r = 1, \dots, s), \\
 & d_f^b \geq 0 \ (f = 1, \dots, h)
 \end{aligned} \tag{03}$$

em que ξ é um *score* de ineficiência desconhecida, indicando a distância entre a fronteira de eficiência e um vetor observado de saídas desejáveis (produção de bens e serviços) e indesejáveis (emissão de gases do efeito estufa). Um número muito pequeno ε_s também é incorporado ao modelo (03) para reduzir a influência de folgas na função objetivo.¹² Os intervalos de dados para ajuste são determinados pelos limites superior e inferior das entradas e dos resultados desejáveis e indesejáveis. Esses limites superior e inferior são especificados por:

$$\begin{aligned} R_i^x &= (m + s + h)^{-1} (\max\{x_{ij} | j = 1, \dots, n\} - \min\{x_{ij} | j = 1, \dots, n\})^{-1} \\ R_r^g &= (m + s + h)^{-1} (\max\{g_{rj} | j = 1, \dots, n\} - \min\{g_{rj} | j = 1, \dots, n\})^{-1} \\ R_f^b &= (m + s + h)^{-1} (\max\{b_{fj} | j = 1, \dots, n\} - \min\{b_{fj} | j = 1, \dots, n\})^{-1}. \end{aligned} \quad (03.1)$$

Adicionalmente, d_i^{x-} , d_r^g e d_f^b são todas variáveis de folga relacionadas a insumos, produtos desejáveis e saídas indesejáveis, respectivamente. O vetor desconhecido, λ , é denominado como estrutural e é usado para conectar todos os fatores de produção por uma combinação convexa. Como a soma das variáveis estruturais é restrita à unidade no modelo (03), os conjuntos de possibilidades de produção e poluição são estruturados sob retornos variáveis.

Dessa forma, o valor da eficiência unificada, considerando retornos variáveis, da k -ésima DMU sob disposição natural é dado por:

$$UEN_v^* = 1 - \left[\xi^* + \varepsilon_s \left(\sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-*} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b*} \right) \right] \quad (04)$$

Ao aplicar a dualidade no modelo (03) tem-se a seguinte formulação:

¹² Segundo Sueyoshi e Goto (2018), um problema do número muito pequeno é que uma decisão subjetiva pode ser incluída na seleção de ε_s , sendo a dificuldade de sua especificação uma desvantagem do modelo (03). Contudo, para os objetivos do presente estudo, a especificação do ε_s não gera prejuízo à análise, visto que o modelo usado é o radial e seu uso aqui é apenas para controlar a relação entre uma pontuação de ineficiência e a soma total de folgas. Este estudo define $\varepsilon_s = 0,0001$ em todos os modelos realizados.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} + \sigma \\
 & \text{sujeito a:} \\
 & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rj} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fj} + \sigma \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n), \\
 & \sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} = 1, \\
 & v_i \geq \varepsilon_S R_i^x \quad (i = 1, \dots, m), u_r \geq \varepsilon_S R_r^b \quad (r = 1, \dots, s), \\
 & w_f \geq \varepsilon_S R_f^b \quad (f = 1, \dots, h)
 \end{aligned} \tag{05}$$

em que v_i , u_r e w_f são variáveis duais relacionadas aos primeiro, segundo e terceiro grupos de restrições do modelo (03). A variável dual (σ) é obtida a partir da quarta equação do modelo (03).

O valor objetivo ótimo do modelo (05) é igual ao do modelo (03) na otimalidade, isso é:

$$\begin{aligned}
 & \xi^* + \varepsilon_S \left(\sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x-*} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b*} \right) \\
 & = \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r^* g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f^* b_{fk} + \sigma^*.
 \end{aligned} \tag{06}$$

Assim, o grau de eficiência unificada sob disposição natural e retornos variáveis também pode ser definido como:

$$UEN_v^* = 1 - \left[\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r^* g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f^* b_{fk} + \sigma^* \right]. \tag{07}$$

O problema de programação linear com retornos variáveis pode ser modificado para atender à pressuposição de retornos constantes, bastando remover a restrição de convexidade, $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ do modelo (03). Assim, o nível de eficiência unificada sob a disposição natural e retornos constantes (UEN_c^*) segue a mesma dinâmica da equação (07), onde a solução ótima é obtida do modelo (03) sem a expressão $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$.

A eficiência de escala é obtida pela razão entre a eficiência com retornos constantes e a eficiência com retornos variáveis.

Similarmente ao modelo sob disposição natural, o modelo DEA que mensura a ineficiência unificada da k -ésima DMU em disposição gerencial e retornos variáveis, sugerido por Sueyoshi e Goto (2012a; 2016; 2018), é:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } \xi + \varepsilon_s \left[\sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x+} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^g + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^b \right] \\
 & \text{sujeito a:} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - d_i^{x+} = x_{ik} \quad (i = 1, \dots, m), \\
 & \sum_{j=1}^n g_{rj} \lambda_j - d_r^g - \xi g_{rk} = g_{rk} \quad (r = 1, \dots, s), \\
 & \sum_{j=1}^n b_{fj} \lambda_j + d_f^b + \xi b_{fk} = b_{fk} \quad (f = 1, \dots, h), \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\
 & \lambda_j \geq 0 \ (j = 1, \dots, n), d_i^{x+} \geq 0 \ (i = 1, \dots, m), d_r^g \geq 0 \ (r = 1, \dots, s), \\
 & d_f^b \geq 0 \ (f = 1, \dots, h).
 \end{aligned} \tag{08}$$

Ao aplicar a dualidade:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} + \sigma \\
& \text{sujeito a:} \\
& - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r g_{rj} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fj} + \sigma \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n), \\
& \sum_{r=1}^s u_r g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f b_{fk} = 1, \\
& v_i \geq \varepsilon_S R_i^x \quad (i = 1, \dots, m), u_r \geq \varepsilon_S R_r^b \quad (r = 1, \dots, s), \\
& w_f \geq \varepsilon_S R_f^b \quad (f = 1, \dots, h).
\end{aligned} \tag{09}$$

E o escore de eficiência unificado da k -ésima DMU em disposição gerencial é medido por:

$$\begin{aligned}
UEM_v^* &= 1 - \left[\xi^* + \varepsilon_S \left(\sum_{i=1}^m R_i^x d_i^{x^{**}} + \sum_{r=1}^s R_r^g d_r^{g^*} + \sum_{f=1}^h R_f^b d_f^{b^*} \right) \right] \\
&= 1 - \left[- \sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik} - \sum_{r=1}^s u_r^* g_{rk} + \sum_{f=1}^h w_f^* b_{fk} + \sigma^* \right].
\end{aligned} \tag{10}$$

3.2 Base de dados e variáveis utilizadas

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no banco de dados do Banco Mundial (*DataBank*) e são referentes a 2014. O *DataBank* é uma ferramenta de análise e visualização que contém um conjunto importante de dados de séries temporais em diversos tópicos e de diversas fontes. Foram analisados os 109 países que apresentavam disponibilidade de informações no período em estudo. Os modelos de programação matemática para os diferentes cenários metodológicos foram construídos e estimados usando o *software* GAMS.

Para a obtenção das medidas de eficiência unificada, utilizou-se as seguintes variáveis, em que X representam os insumos, G os produtos desejáveis e B os produtos indesejáveis:

X_1 : Força de trabalho, composta pelo fornecimento de mão de obra, de 15 anos de idade ou mais, para a produção de bens e serviços de uma economia, em milhões de trabalhadores;

X_2 : Formação bruta de capital fixo (FBCF), que consiste no desembolso de adições ao imobilizado mais as mudanças líquidas no nível de estoques de uma economia, em bilhões de dólares internacionais (Paridade Poder de Compra - PPC);

X_3 : Consumo de energia, referente ao uso de energia primária antes da transformação para outros combustíveis de uso final como insumos, em bilhões de quilogramas de óleo equivalente;

X_4 : Esgotamento de recursos naturais, representado pela soma do esgotamento líquido da floresta, do esgotamento de energia e da extração mineral, em bilhões de dólares internacionais (PPC) (baseado no % da Renda Nacional Bruta);

G : Produto Interno Bruto (PIB), composto pela soma do valor agregado bruto de todos os residentes no ano, em bilhões de dólares internacionais (PPC);

B_1 : Emissão de CO_2 , dióxido de carbono emitido em decorrência da queima de combustíveis fósseis e da fabricação de cimento, em mil quilotoneladas; e

B_2 : Outras emissões totais, emissões de gases de efeito estufa das diversas estruturas produtivas (indústria, serviços, agricultura, pecuária, extração florestal etc.), derivadas de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), em mil quilotoneladas de CO_2 equivalente.

3.3 Análise e ajustes nos dados

Como em qualquer técnica empírica, o modelo DEA¹³ é baseado em suposições, necessitando serem reconhecidas e avaliadas, como a sensibilidade a erros de medida, a impossibilidade em comparar os escores de eficiência entre

¹³ Existem vários outros modelos e pressuposições que podem ser incorporados na formulação dos problemas de programação utilizados pela DEA, inclusive em análise ambientais. Para descrições mais detalhadas da metodologia recomenda-se a consulta de livros textos como, por exemplo, Coelli *et al.* (2005), Ferreira e Gomes (2009), Cooper, Seiford e Zhu (2011) e Sueyoshi e Goto (2018).

diferentes estudos e a sensibilidade à especificação dos fatores e ao tamanho do grupo sob análise. Dessa forma, importantes análises e tratamentos foram considerados neste trabalho, a saber: (i) ajuste de dados; (ii) método de detecção e remoção de *outliers*; e (iii) testes não paramétricos de fronteiras de eficiência.

(i) Ajuste de dados: O presente estudo trabalha com diferentes insumos e produtos, com distintas unidades de medidas e dimensões. Quando uma entrada (*input*) ou uma saída (*output*) é muito maior (numericamente) do que os demais insumos e produtos, o fator numericamente superior geralmente domina todo o processo computacional da DEA (Sueyoshi; Goto, 2013). Nesse caso, optou-se por ajustar o conjunto de dados dividindo todas as observações do insumo/produto pela média do respectivo insumo/produto. Acredita-se que tal ajuste de dados produza resultados DEA mais confiáveis.

(ii) Método de detecção e remoção de *outliers*: dado o fato de que um problema crítico do método DEA é a grande sensibilidade na presença de *outliers* e erros amostrais, neste trabalho utilizou-se o procedimento “*jackstrap*”, desenvolvido por Sousa e Stosic (2003), para detectar a presença destes possíveis *outliers* que poderiam afetar a fronteira de eficiência.¹⁴ Considerando o critério de corte sugerido por Sousa e Stosic (2005), nenhuma DMU analisada apresentou influência atípica, ou seja, não houve a ocorrência de observações discrepantes em relação à média, fato que seria suficiente para deslocar a fronteira e aumentar o nível médio de eficiência de forma artificial, comprometendo o nível de eficiência das demais DMUs e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados. A inexistência de *outliers* pode ser justificada pela qualidade da base de dados utilizada neste estudo e pela criteriosa seleção dos países pelo nível de informações adequadas aos objetivos aqui propostos.

(iii) Testes não paramétricos de fronteiras de eficiência: antes de executar os modelos para cálculo das medidas de eficiência, é preciso verificar se as nações estudadas, mesmo com estratos de produção (e poluição) diferentes, fazem parte de uma mesma fronteira de eficiência ou se cada estrato de produção gera sua própria fronteira. Para verificar se há diferenças entre as fronteiras de eficiência dos países quando separados por estratos de produção, procedeu-se com o teste não

¹⁴ A análise dos dados com o objetivo de verificar a presença das observações com valores considerados atípicos foi realizada apenas para o modelo DEA sob disposição natural, pelo fato de suas características mais próximas aos modelos DEA convencionais (nos quais os métodos de detecção de *outliers* foram desenvolvidos).

paramétrico *U* de Mann-Whitney (Banker; Zheng; Natarajan, 2010).¹⁵ Os resultados evidenciaram que não há diferenças significativas nas fronteiras de eficiência dos grupos em questão, uma vez que o tamanho da produção não afeta a eficiência calculada. Diante disso, as análises realizadas neste trabalho consideram uma única fronteira de eficiência, independente do volume de produção existente.

4. Resultados e discussão: a eficiência unificada sob disposições natural e gerencial

Antes de analisar os resultados dos modelos DEA de eficiência, precede-se com a análise de correlação entre insumos e produtos utilizados no modelo, bem como as estatísticas descritivas destas variáveis. Tais análises são importantes para compreender as grandezas e relações que estão sendo estudadas. A Tabela 1 apresenta a correlação entre as variáveis de entrada e de saída.

Tabela 1 - Correlação entre as variáveis de entrada e de saída do modelo (2014)

	Trabalho	FBCF	Energia	Recursos
PIB	0,8131	0,9698	0,9783	0,6559
CO₂	0,8857	0,9667	0,9853	0,7463
Emissões	0,8888	0,9521	0,9763	0,7620

Fonte: resultados da pesquisa.

Os coeficientes de correlação de Pearson são elevados e significativos (a um nível de significância de 1%), indicando a forte interação entre insumos e produtos utilizados nos modelos, fator importante na metodologia DEA.

Já a Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas dos insumos e produtos utilizados nos modelos para o ano de 2014. Cabe observar aqui a alta heterogeneidade dos países quanto aos diferentes insumos e produtos, com destaque para o PIB (maior desvio padrão e diferença entre mínimo e máximo) e emissões de CO₂ (maior coeficiente de variação). Tais diferenças poderiam sugerir, inicialmente, a presença de mais de uma fronteira de eficiência, visto a possibilidade de diferentes estruturas tecnológicas produtivas. Contudo, o teste não paramétrico

¹⁵ No presente estudo, os países foram divididos em três estratos de acordo com o PIB no ano de 2014: 1/3 dos países com maior PIB; 1/3 dos países com PIB intermediários; 1/3 dos países com os menores PIB. O teste não paramétrico de fronteiras de eficiência foi realizado apenas para o modelo DEA sob disposição natural. O teste de *U* de Mann-Whitney também foi realizado para três estratos de países divididos de acordo com os níveis de emissões de CO₂ no ano de 2014.

U de Mann-Whitney, anteriormente apresentado, rechaça a hipótese de existência de distintas fronteiras, inserindo os 109 países estudados em uma mesma população.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas das variáveis de entrada e de saída dos modelos (2014)

<i>Input/output</i>	Média	Máximo	Mínimo	Coef. de variação (%)
Força de trabalho (milhões)	27,68	786,57	0,21	325,46
FBCF (\$ bilhões)	172,35	4.721,38	1,06	332,50
Energia total (kg bilhões)	114,09	3.051,50	1,81	326,35
Recursos naturais (\$ bilhões)	19,15	357,93	0,01	258,68
Emissões de CO ₂ (kt mil)	294,91	10.291,93	2,13	382,40
Emissões totais (kt mil)	438,07	12.454,71	7,43	319,23
PIB PPP (\$ bilhões)	954,31	18.336,44	10,70	270,19

Fonte: resultados da pesquisa.

Ao analisar as estatísticas descritivas, observa-se, ainda, que todos os valores máximos de *inputs* e *outputs* pertencem a China, indicando as dimensões continentais deste país. Já os valores mínimos para as diferentes variáveis encontram-se distribuídos entre países africanos (Togo – FBCF e PIB; Namíbia – energia; Níger – emissões de CO₂), asiático (Brunei – força de trabalho), latino-americano (Panamá – recursos naturais) e europeu (Chipre – emissões totais). Os valores dos coeficientes de variação reforçam as diferentes estruturas produtivas nacionais que estão sendo estudadas, além de indicarem possíveis diferenciais na escala de produção e poluição dos países, justificando a análise dos modelos DEA com retornos variáveis.

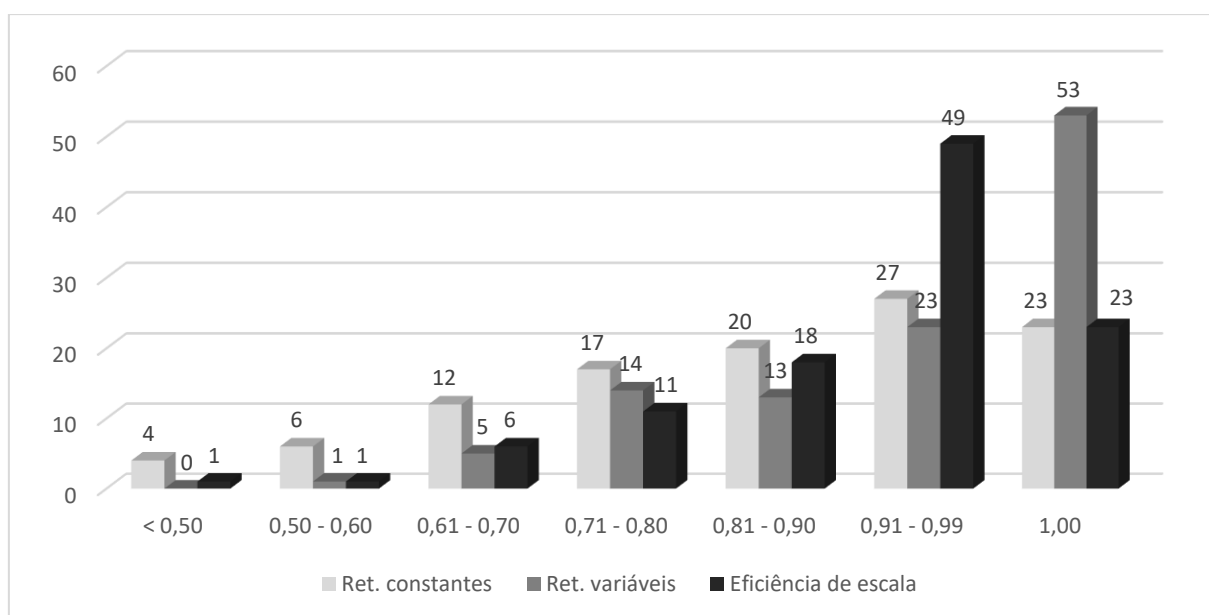
Com base nos objetivos específicos deste trabalho, a Figura 2 apresenta a distribuição dos 109 países que se encontram na amostra segundo os estratos de eficiência no modelo sob disposição natural, pressupondo tanto retornos constantes quanto variáveis à escala. Os níveis de eficiência de cada país, considerando o modelo sob disposição natural, encontram-se na Tabela A.1, no Apêndice.

É possível observar um quantitativo considerável de países com níveis elevados de eficiência pressupondo retornos variáveis de escala (81,65% dos países com eficiência superior a 0,80), sendo que quase a metade dos países (48,62%) são consideradas 100% eficientes. A eficiência média sob disposição natural e

pressupondo retornos variáveis é de 92,14% e apenas um país apresenta eficiência inferior a 0,60 (Venezuela – 0,5964).

Por outro lado, ao considerar o modelo com retornos constantes à escala, o nível médio de eficiência atinge 83,66%, sendo que a China apresenta o pior indicador de eficiência (0,3494). Ademais, nesse modelo, os níveis de eficiência dos países se distribuem melhor ao longo dos intervalos do histograma apresentado na Figura 2. Apesar dos níveis de eficiência sob retornos constantes serem sempre iguais ou inferiores aos níveis de eficiência sob retornos variáveis, a diferença na média e a distribuição dos países nos dois modelos dão indícios do papel da escala de produção na análise da eficiência unificada. A eficiência de escala média é de 0,9074, com um desvio padrão de 0,1238.

Figura 2 – Distribuição dos países segundo os intervalos de medidas de eficiências técnica e de escala, obtidas no modelo sob disposição natural



Fonte: resultados da pesquisa.

Ao analisar a distribuição geográfica dos países, de acordo com as medidas de eficiência obtidas no modelo sob disposição natural e retornos variáveis, nota-se que não há uma relação locacional dos mesmos com as medidas de eficiência mais elevadas, nem uma relação direta (ou indireta) entre altos níveis de eficiência e o

desenvolvimento econômico das nações. As dez maiores economias do mundo¹⁶ são consideradas 100% eficientes, mas alguns países que estão entre os menores PIBs do mundo (Togo, Moldávia, Níger e Namíbia, por exemplo) também apresentam este nível de eficiência. Tal resultado indica que diferentes estruturas produtivas e econômicas, com distintas combinações entre os insumos e produtos, podem ser consideradas eficientes. Dessa forma, essas proporções de usos diferentes garantem um maior número de ajustes possíveis para as unidades consideradas ineficientes.

Entre os países menos eficientes (abaixo de 0,7000), além da Venezuela, encontram-se os também latino-americanos Bolívia, Honduras e Equador, Bielorrússia na Europa e Vietnã na Ásia. Assim como na eficiência, não há um padrão entre os países mais ineficientes, apesar de serem normalmente nações em desenvolvimento localizadas nos continentes mais pobres (América Latina, África e Ásia) ou nações europeias com PIBs menores.

Entre os países nos grupos intermediários de eficiência, destaques podem ser dados ao Canadá (0,7719) e à Austrália (0,8018). O Canadá é o 16^a maior PIB e o 9^o maior emissor de CO₂ entre os países presentes neste estudo, mas também é um dos países que mais sofrem com os impactos ambientais, devido às suas características geográficas. O intensivo uso das usinas de carvão e óleo na matriz energética canadense, a exploração florestal e o impacto potencializado das emissões globais de gases de efeito estufa no país podem ser indícios da ineficiência identificada. A Austrália, com nível de eficiência de 80,18%, também apresenta características, fatores e influências similares para justificarem o seu nível de ineficiência.

Ao analisar a eficiência de escala, alguns países considerados eficientes pressupondo retornos variáveis (eficiência pura) apresentam altos níveis de ineficiência de escala. O destaque é a China, que, como já mencionado, apresenta o menor nível de eficiência de escala entre os países estudados (34,94%); as dimensões populacionais, econômicas e produtivas chinesas justificam os problemas de escala do país, aliado ao fenômeno denominado *rebound effect* (efeito bumerangue) (Binswanger, 2001). A eficiência pura (eficiência medida pelo modelo com retornos variáveis) é sinônimo de produtividade, ou seja, de economia de recursos (insumos) e redução de custos; operar com tal eficiência, por sua vez,

¹⁶ Os maiores PIBs no ano de 2014, a saber: China, Estados Unidos, Índia, Japão, Alemanha, Rússia, Brasil, Indonésia, França e Reino Unido.

estimula a demanda e, conseqüentemente, o aumento da produção, anulando parcialmente a economia de recursos inicial (*rebound effect*), acarretando o problema de escala. Esse fato, a nível nacional, torna-se mais comum em países em desenvolvimento, visto a possibilidade de crescimento econômico (Roy, 2000; Jin, 2007). Fato similar, mas com menor intensidade, pode ser observado na Indonésia, Rússia, Índia e Brasil.

Assim como na eficiência com retornos variáveis, não é plausível traçar um padrão locacional na identificação dos países eficientes quanto a escala, mesmo que a maioria dos países 100% eficientes esteja na Europa e na Ásia.

A Tabela 3 apresenta as estatísticas dos níveis de eficiência sob disposição natural para dois grupos de países, segundo o PIB.

Tabela 3 – Estatísticas das eficiências dos países, sob disposição natural, separados em grupos segundo a grandeza do PIB

Países	Modelo	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
Maiores PIBs (50)	CRS	0,8627	1,0000	0,3494	0,1448
	VRS	0,9411	1,0000	0,5964	0,0978
	SEN	0,9166	1,0000	0,3494	0,1167
Menores PIBs (59)	CRS	0,8144	1,0000	0,4136	0,1592
	VRS	0,9047	1,0000	0,6135	0,1165
	SEN	0,8996	1,0000	0,5493	0,1300
Todos	CRS	0,8366	1,0000	0,3494	0,1540
	VRS	0,9214	1,0000	0,5964	0,1094
	SEN	0,9074	1,0000	0,3494	0,1238

Fonte: resultados da pesquisa.

* CRS: retornos constantes; VRS: retornos variáveis; SEN: eficiência de escala

Apesar de não existir uma relação direta entre tamanho da economia, mensurado através do PIB, e eficiência unificada, observa-se que os países com os maiores PIBs apresentam valores médios de eficiência superiores aos de menores PIBs. Contudo, os valores mínimos em todos os modelos de eficiência encontram-se associados a países pertencentes ao grupo de maiores PIBs, dos países que compõem a base de dados (China – 1º; e Venezuela – 33º). Observa-se, ainda, que o problema da ineficiência de escala é superior à questão da pura ineficiência nos dois estratos de países, mas mais evidenciado nas nações com maiores PIBs.

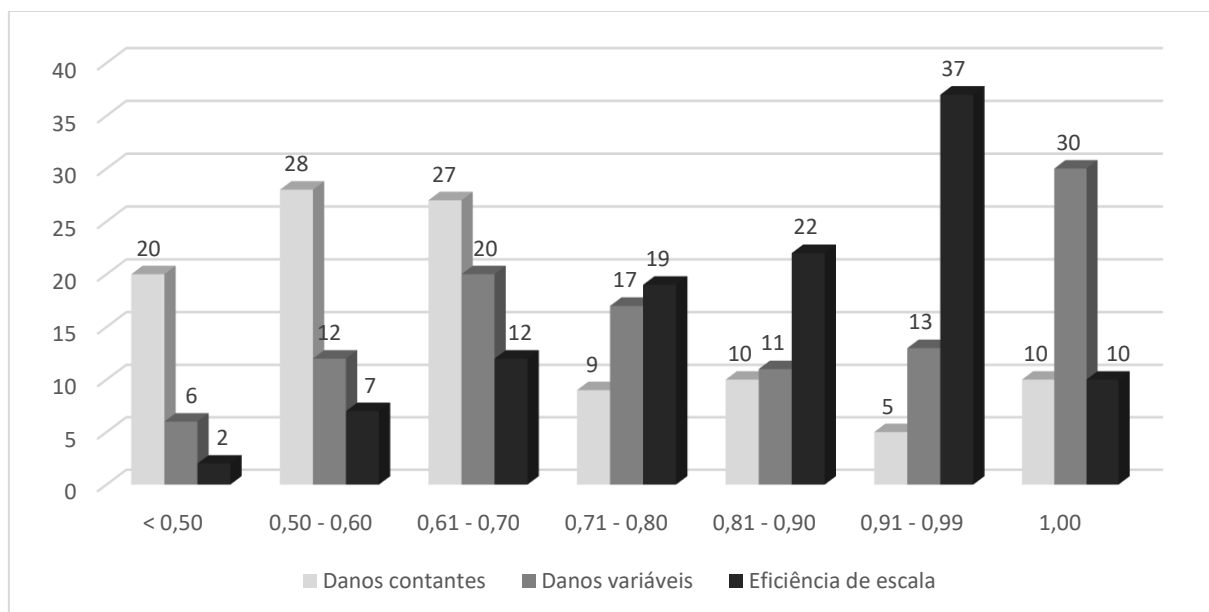
Como a técnica DEA e suas extensões mensuram a eficiência de forma comparativa, é possível detectar, entre os países estudados, as DMUs eficientes responsáveis pelo fato de determinada nação ter sido considerada ineficiente (*benchmarks*). Dessa forma, para cada unidade ineficiente, os modelos DEA fornecem seus respectivos *benchmarks*, determinados pela projeção dessas unidades na fronteira de eficiência; ou seja, os *benchmarks* são as DMUs eficientes que atuam como referência para as ineficientes na obtenção de eficiência, projetando essas unidades na fronteira.

Os cinco principais *benchmarks* no modelo sob disposição natural e retornos variáveis são Sri Lanka, Egito, Itália, Arábia Saudita e Suíça. Esses e outros *benchmarks* diferenciam-se quanto às dimensões produtivas, econômicas e territoriais, localização, matrizes energéticas, proporções entre insumos e produtos, entre outros fatores. Tais diferenças indicam que uma única DMU normalmente não pode ser a referência para um conjunto de unidades ineficientes com características tão heterogêneas. Assim, diante da heterogeneidade das 109 nações analisadas, cabe também uma diversidade entre as unidades de referência, o que foi constatado neste trabalho.

Baseado nos *benchmarks* para cada propriedade ineficiente é possível mensurar as reduções possíveis nas emissões de gases após a correção das ineficiências. Dessa forma, as emissões mundiais de gases totais (CO₂ e outras emissões), corrigindo apenas os problemas de ineficiência técnica, podem ser reduzidas em 7,26%. No caso de ajustes tanto técnicos quanto de escala tal redução poderia atingir 44,40% das emissões globais de 2014. Tais percentuais tornam-se ainda mais relevantes ao compará-los com as metas propostas no Protocolo de Quioto, em 1997, que estabeleciam redução média de emissões de gases do efeito estufa de 5% (Moreira; Giometti, 2008). Ao considerar o Acordo de Paris, assinado em 2015, essas possíveis reduções de ineficiências tornam-se fundamentais para se atingir o limite de aquecimento de no máximo 2°C até o final do século XXI.

Ao mudar a análise para o modelo sob disposição gerencial, em que o desempenho ambiental dos países é tão importante quanto seu desempenho operacional, constata-se, pela Figura 3, a redução do número de países com indicadores elevados de eficiência. Os níveis de eficiência de cada país, considerando o modelo sob disposição gerencial, encontram-se na Tabela A.1, no Apêndice.

Figura 3 - Distribuição dos países segundo os intervalos de medidas de eficiências técnica e de escala, obtidas no modelo sob disposição gerencial



Fonte: resultados da pesquisa.

Observa-se que 68,81% dos países estudados encontram-se com eficiência abaixo de 0,70, pressupondo danos constantes à escala, sendo que a média é de 0,6565 e o mínimo de 0,3459 (Cazaquistão). Já na pressuposição de danos variáveis, a média de eficiência é de 79,25% e a eficiência mínima pertence à Bolívia (40,68%). Na análise da eficiência de escala, novamente a China desponta como a mais ineficiente, com indicador de 0,3841. Esses e outros resultados também podem ser observados na Tabela 4, que apresenta as estatísticas das eficiências dos países, sob disposição gerencial, separados em grupos segundo o volume de emissão de CO₂.

Tabela 4 – Estatísticas das eficiências dos países, sob disposição gerencial, separados em grupos segundo o volume de emissão de CO₂

Países	Modelo	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
Maiores emissores de CO ₂ (50)	CDS	0,6128	1,0000	0,3459	0,1563
	VDS	0,8052	1,0000	0,4084	0,1850
	SEM	0,7757	1,0000	0,3841	0,1520
Menores emissores de CO ₂ (59)	CDS	0,6936	1,0000	0,3686	0,1915
	VDS	0,7817	1,0000	0,4068	0,1734
	SEM	0,8875	1,0000	0,5574	0,1306
Todos	CDS	0,6565	1,0000	0,3459	0,1800
	VDS	0,7925	1,0000	0,4068	0,1784
	SEM	0,8362	1,0000	0,3841	0,1509

Fonte: resultados da pesquisa.

* CDS: danos constantes; VDS: danos variáveis; SEM: eficiência de escala

A Tabela 4 indica que, em média, os maiores emissores de CO₂ (que em sua maioria são os maiores PIBs) apresentam eficiência pura superior à média dos países estudados, apesar de um desvio padrão superior. Já ao analisar a questão da escala, os países que compõem o grupo dos menores emissores de CO₂ se sobressaem, com valor médio bem superior aos maiores poluidores e à média geral.

Na análise da distribuição geográfica dos países, de acordo com as medidas de eficiência (danos variáveis) obtidas no modelo sob disposição gerencial, observa-se que as nações eficientes são semelhantes ao modelo sob disposição natural, com algumas exceções. Dos dez maiores emissores de CO₂ no ano de 2014¹⁷, apenas Coreia do Sul (0,8602) e Canadá (0,7617) não são 100% eficientes. Já das dez maiores economias do mundo, apenas o Reino Unido (0,9569) não atingiu a eficiência máxima. Os países com os menores níveis de eficiência encontram-se dispersos sobre todos os continentes, não encontrando fatores geográficos que justifiquem tais ineficiências.

Ao analisar a eficiência de escala, sob disposição gerencial, observa-se um número considerável de países ineficientes, destacando países 100% eficientes sob retornos variáveis (China, Rússia, Estados Unidos, Japão, Índia, Alemanha, Brasil, Indonésia, entre outros). Verifica-se, ainda, que todos os países ineficientes quanto à escala apresentam retornos crescentes a danos, ou seja, os danos crescem a taxas marginais crescentes. Isso reforça a importância de traçar estratégias para reduzir os

¹⁷ Os dez maiores emissores de CO₂ no ano de 2014 são: China, Estados Unidos, Índia, Rússia, Japão, Alemanha, Arábia Saudita, Coreia do Sul, Canadá e Brasil.

impactos negativos ao meio ambiente, pois a possibilidade de danos pode ser ainda maior em conjunturas de crescimento econômico insustentáveis.

Para as DMUs eficientes quanto à escala, ou seja, que apresentam danos constantes à escala, não é recomendado, mas aceitável, manter a dimensão produtiva atual. Já para os países ineficientes, recomenda-se a diminuição do tamanho atual da matriz produtiva. Como tal tipo de redução não é uma solução trivial ao analisar uma economia nacional, sugere-se que a DMU desenvolva e utilize inovações em tecnologia ecológica (ecotecnologia) para a proteção ambiental.

Os cinco principais *benchmarks* no modelo sob disposição gerencial e retornos variáveis são Suíça, Níger, Suécia, França e Angola. Assim como no modelo sob disposição natural, observa-se que esses e outros *benchmarks* apresentam características heterogêneas, que se enquadram como referências para as diferentes DMUs ineficientes.

Baseado nos *benchmarks*, a redução possível na emissão mundial de gases totais (CO₂ e outras emissões), corrigindo apenas os problemas de ineficiência técnica, atinge 7,55%. No caso de ajustes tanto técnicos quanto de escala tal redução poderia atingir 29,29% das emissões globais de 2014.

Apesar das reduções no modelo sob disposição gerencial apresentar reduções similares (para ajustes técnicos) e até inferiores (no caso de correções de escala), o desenvolvimento de ecotecnologias, base da modelagem sob disposição gerencial, pode gerar retornos substanciais no longo prazo, superando, inclusive, os ganhos auferidos sob a modelagem natural.

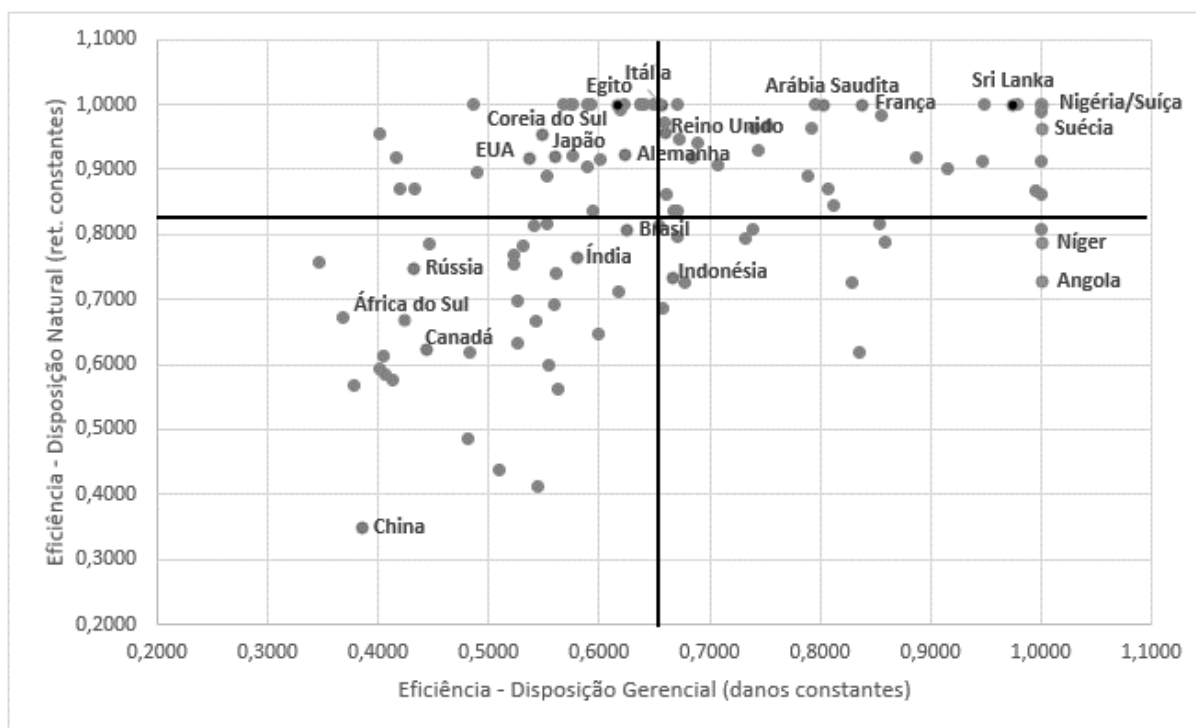
Diante dos resultados apresentados, tanto no modelo sob disposição natural quanto na modelagem sob disposição gerencial, observa-se importantes fatores de ineficiência, principalmente relacionados à escala. Ademais, ao colocar o desempenho ambiental como prioridade, no modelo sob disposição gerencial, as ineficiências tornam-se ainda mais evidentes. Dessa forma, acredita-se que as políticas internacionais para redução dos efeitos danosos ao meio ambiente possam propor metas às nações, balizadas por indicadores de eficiência como os aqui propostos, mas sempre considerando as especificidades e dificuldades políticas, econômicas e institucionais de cada nação.

A busca pela eficiência sob disposição natural tem um interesse mais individual da nação, pelo fato de estabelecer o desempenho operacional como prioridade, já a eficiência sob disposição gerencial tem um interesse mais social, e

poderia definir-se como pauta nos debates sobre as políticas globais de mitigação das emissões de gases danosos ao meio ambiente. As figuras 4 e 5 apresentam as relações entre os níveis de eficiência, pressupondo retornos constantes e eficiência de escala, respectivamente, nos dois modelos analisados (natural e gerencial).

Observa-se, na Figura 4, que todos os dez maiores emissores globais de CO₂, em 2014, com exceção da Arábia Saudita, estão com níveis de eficiência abaixo da média, sob disposição gerencial. Como já discutido, tais níveis de ineficiência devem-se, quase exclusivamente, aos problemas de escala, o que pode ser constatado ao comparar as figuras 4 e 5. Ademais, diversos países que precisam buscar a eficiência unificada sob disposição gerencial são nações consideradas ricas e que possuem capital financeiro e humano na promoção de ecotecnologias, sendo passível, portanto, que promovam ganhos de eficiência com relação ao desempenho ambiental.

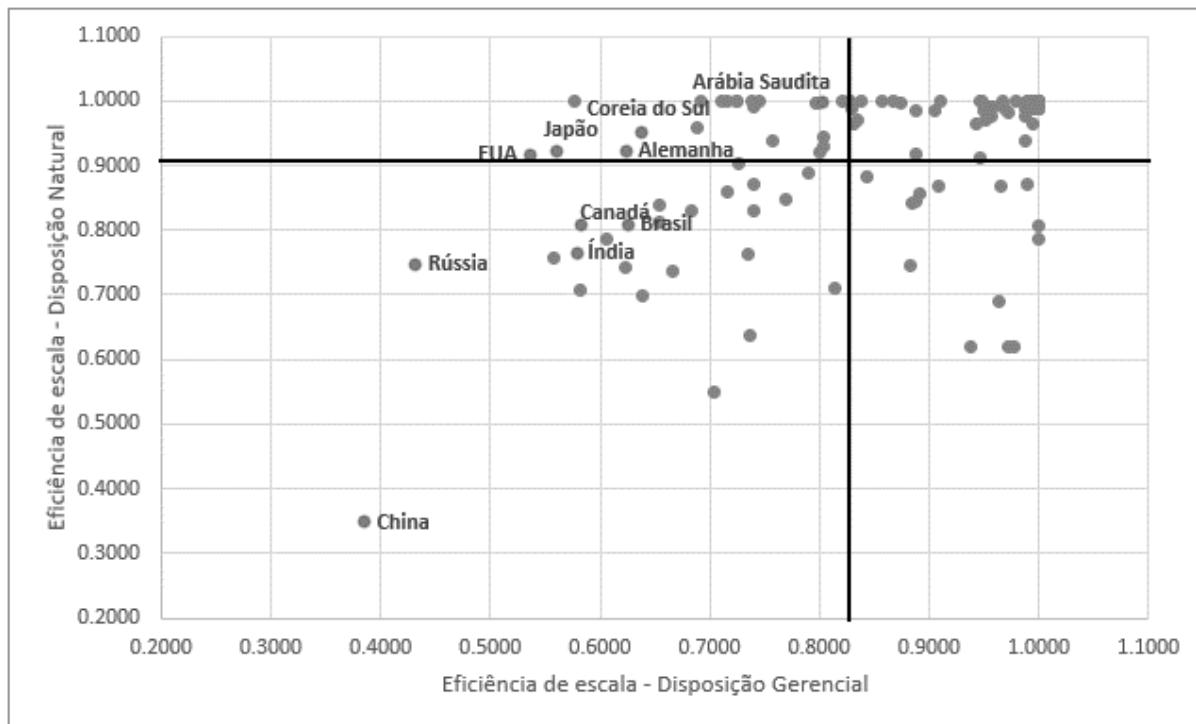
Figura 4 – Distribuição dos países conforme resultados obtidos nos modelos de eficiência, sob disposição natural e gerencial



Fonte: resultados da pesquisa.

* As linhas pretas vertical e horizontal demarcam as médias dos dados em cada eixo.

Figura 5 – Distribuição dos países conforme resultados obtidos nos modelos de eficiência de escala, sob disposição natural e gerencial



Fonte: resultados da pesquisa.

* As linhas pretas vertical e horizontal demarcam as médias dos dados em cada eixo

Um outro ponto que pode ser destacado nas figuras 4 e 5 refere-se ao posicionamento dos países que compõem o BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul). Com exceção da África do Sul, a ineficiência desses países refere-se à escala (retornos e danos), reforçando a ocorrência do *rebound effect* em países em desenvolvimento e o papel da escala na análise do desempenho ambiental das nações.

O destaque quantitativo encontrado no papel da escala para a sustentabilidade ambiental já é conhecido na literatura da Economia Ecológica que, preocupada com a base finita de recursos, hierarquiza os objetivos, de forma que o conceito de escala do sistema econômico e a distribuição adequada dos recursos antecedem a eficiência técnica e alocativa, conforme apresentado por Daly (1992) e Andrade (2012). Contudo, neste trabalho, ambos conceitos (pura eficiência e escala)

são destacados, principalmente pelo fato de os problemas de escala apresentarem uma complexidade maior de serem sanados, conforme exposto por Fuks (2012)¹⁸.

Os únicos países que apresentaram eficiência máxima em todos os modelos foram Nigéria e Suíça, que possuem, respectivamente, os 20º e 35º maiores PIBs e são as 35ª e 56ª maiores emissoras de CO₂ entre as 109 economias estudadas. A Nigéria, apesar de apresentar indicadores socioeconômicos ruins, apresenta grandes riquezas econômicas, com reservas de recursos naturais, como petróleo, gás natural, carvão e outros minerais. A matriz energética nigeriana, em 2014, foi composta basicamente pelo gás natural (83%) e pelas hidroelétricas (16%). Por sua vez, a Suíça foi considerada a nação mais sustentável do mundo, segundo o *Environmental Performance Index 2014*¹⁹ (Hsu *et al.*, 2014), além de figurar-se entre os maiores PIBs *per capita* do mundo (5º entre as 109 economias deste estudo).

Um fato que deve ser evidenciado neste trabalho é que as medidas de eficiência calculadas não levam em consideração ponderações acerca dos níveis de desenvolvimento de cada DMU, de forma que um país pode apresentar níveis de desenvolvimento econômico consideravelmente baixos e, mesmo assim, ser considerado eficiente sob uma ótica meramente técnica. Contudo, é inaceitável concluir que nações com altos níveis relativos de eficiência, como Nigéria, Sri Lanka, República Democrática do Congo e Tanzânia, não precisam melhorar seus processos produtivos e a tecnologia envolvida nos mesmos. O que pode ser observado é que uma nação pobre, mas eficiente no presente modelo, consegue os melhores resultados possíveis com os recursos (insumos) que dispõe.

5. Considerações finais

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar, por meio da metodologia de análise envoltória de dados e suas extensões, a eficiência unificada de 109 países, considerando duas vertentes de prioridade: a produtiva ou operacional e a ambiental.

¹⁸ Fuks (2012) refletiu que a escala do sistema econômico global se tornou uma questão crítica para que a capacidade de suporte da biosfera não se deteriore no longo prazo. Para o autor, tal capacidade de suporte da biosfera deve orientar as decisões sociais e políticas, visto que alguns trabalhos já indicam que o sistema econômico global se encontra além da escala sustentável.

¹⁹ O *Environmental Performance Index* (EPI) analisa dois grupos de critérios: saúde ambiental (o quanto os problemas ambientais afetam a saúde e o bem-estar da população) e vitalidade de ecossistemas (inclui agricultura, ar, biodiversidade, mudança do clima, estoque pesqueiro, florestas e recursos hídricos).

Os resultados indicaram que fatores locais não influenciaram os níveis de eficiência, seja sob disposição natural ou gerencial. Também não foi identificada uma relação entre níveis de eficiência e o desenvolvimento econômico das nações. Os países eficientes apresentaram heterogeneidades em suas estruturas produtivas e econômicas e, conseqüentemente, nas combinações entre os insumos e produtos, possibilitando um maior número de ajustes possíveis para as unidades consideradas ineficientes. Outro ponto de destaque foi a ineficiência de escala, principalmente nas nações mais ricas e mais poluidoras, indicando que o fator escala tem papel relevante na gestão de uma eficiência que considera tanto fatores operacionais quanto ambientais.

As análises realizadas indicaram a possibilidade de reduções consideráveis nas emissões de gases poluidores caso os países fossem projetados para a fronteira de eficiência. Se essa projeção ocorrer por meio de desenvolvimento de ecotecnologias, base da modelagem sob disposição gerencial, pode-se garantir retornos substanciais e consistentes no longo prazo, permitindo, inclusive, metas audaciosas de redução das emissões de gases do efeito estufa, necessárias à conjuntura climática existente, estabelecidas principalmente pelo Acordo de Paris.

Dessa forma, acredita-se que indicadores de eficiência como os aqui propostos, principalmente a eficiência sob disposição gerencial, poderiam contribuir nos debates sobre as políticas globais de mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

Em síntese, acredita-se que os resultados apresentados neste trabalho sejam um passo para que abordagens metodológicas, como a análise envoltória de dados e suas extensões, contribuam na definição de políticas ecoeficientes globais. Espera-se, ainda, que extensões futuras deste trabalho, valendo-se da eliminação de limitações encontradas no presente estudo (como a estruturação da base de dados), possam contribuir de forma mais efetiva com a literatura e com a proposição de políticas, ao analisarem todos os fatores conjunturais que possam estar impedindo ganhos de eficiência nos países. Sugere-se, por fim, o empenho das diversas instituições nacionais e globais para que os dados e informações sejam disponibilizados com a confiabilidade e a tempestividade necessárias ao desenvolvimento das pesquisas ambientais e climáticas.

Referências

- ANDRADE, D. C. Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica. *Leituras de Economia Política*, v. 11, n. 14, p. 1-31, 2012.
- BANKER, R. D. *et al.* Returns to scale in DEA. Cap. 2. *In: COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (Eds.). Handbook on data envelopment analysis*. 2 ed. New York: Springer, 2011.
- BANKER, R. D.; ZHENG, Z. E.; NATARAJAN, R. DEA-based hypothesis tests for comparing two groups of decision making units. *European Journal of Operation Research*, v. 206, n. 1, p. 231-238, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.01.027
- BINSWANGER, M. Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect? *Ecological Economics*, v. 36, n. 1, p. 119-132, 2001. DOI: 10.1016/S0921-8009(00)00214-7
- CAIADO, R. G. G. *et al.* Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency-A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 890-904, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.166
- CAMIOTO, F. C. *et al.* Energy efficiency analysis of G7 and BRICS considering total-factor structure. *Journal of Cleaner Production*, v. 122, p. 67-77, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.061
- COELLI, T. J. *et al.* *An introduction to efficiency and productivity analysis*. 2 ed. New York: Springer, 2005. 349 p. DOI: 10.1007/b136381
- COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. 2 ed. Nova York: Springer, 2011. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-6151-8
- DALY, H. E. Allocation, distribution, and scale: towards an economics that is efficient, just, and sustainable. *Ecological Economics*, v. 6, n. 3, p. 185-193, 1992. DOI: 10.1016/0921-8009(92)90024-M
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. *Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações*. Viçosa: Editora UFV, 2009. 389 p.
- FUKS, M. Reflexões sobre o paradigma da economia ecológica para a gestão ambiental. *Estudos Avançados*, v. 26, n. 74, p. 105-120, 2012.

GOTO, M.; OTSUKA, A.; SUEYOSHI, T. DEA (Data Envelopment Analysis) assessment of operational and environmental efficiencies on Japanese regional industries. *Energy*, v. 66, p. 535-549, 2014. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.020

HATFIELD-DODDS, S *et al.* Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050: with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. *Journal of Cleaner Production*, v. 144, p. 403-414, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.170

HSU, A. *et al.* *The 2014 environmental performance index*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2014.

JIN, S. H. The effectiveness of energy efficiency improvement in a developing country: Rebound effect of residential electricity use in South Korea. *Energy Policy*, v. 35, n. 11, p. 5622-5629, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.05.028

KORHONEN, P. J.; LUPTACIK, M. Eco-efficiency analysis of power plants: an extension of data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 154, n. 2, p. 437-446, 2004. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00180-2

KUMAR, S. Environmentally sensitive productivity growth: a global analysis using Malmquist-Luenberger index. *Ecological Economics*, v. 56, n. 2, p. 280-293, 2006. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.02.004

KUOSMANEN, T.; KORTELAJINEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005. DOI: 10.1162/108819805775247846

MARDANI, A. *et al.* Data envelopment analysis in energy and environmental economics: an overview of the state-of-the-art and recent development trends. *Energies*, v. 11, n. 8 (2002), p. 1-21, 2018. DOI: 10.3390/en11082002

MARDANI, A. *et al.* A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 1298-1322, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.030

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. *Contexto Internacional*, v. 30, n. 1, p. 9-47, 2008. DOI: 10.1590/S0102-85292008000100001

PODINOVSKI, V. V.; KOUSMANEN, T. Modeling weak disposability in data envelopment analysis under relaxed convexity assumptions. *European Journal of Operational Research*, v. 211, n. 3, p. 577-585, 2011. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.12.003

RAY, S. C. *Data Envelopment Analysis: theory and techniques for economics and operations research*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 361 p.

ROY, J. The rebound effect: some empirical evidence from India. *Energy Policy*, v. 28, n. 6-7, p. 433-438, 2000. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00027-6

SOUSA, M. C. S.; STOSIC, B. Jackstrapping DEA scores for robust efficiency measurement. *In: Encontro Nacional de Econometria*, 20., Porto Seguro - BA. *Anais [...]* Rio de Janeiro: SBE, 2003.

SOUSA, M. C. S.; STOSIC, B. Technical efficiency of the Brazilian municipalities: correcting nonparametric frontier measurements for outliers. *Journal of Productivity Analysis*, v. 24, n. 2, p. 155-179, 2005. DOI: 10.1007/s11123-005-4702-4

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Can environmental investment and expenditure enhance financial performance of US electric utility firms under the clean air act amendment of 1990? *Energy Policy*, v. 37, n. 11, p. 4819-4826, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.06.038

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Measurement of a linkage among environmental, operational and financial performance in Japanese manufacturing firms: a use of data envelopment analysis with strong complementary slackness condition. *European Journal of Operational Research*, v. 207, n. 3, p. 1742-1753, 2010a. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.07.024

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Should the US Clean Air Act include CO₂ emission control? Examination by data envelopment analysis. *Energy Policy*, v. 38, n. 10, p. 5902-5911, 2010b. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.044

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Operational synergy in the electric utility industry under the influence of US deregulation policy: a linkage to financial performance and corporate value. *Energy Policy*, v. 39, n. 2, p. 699-713, 2011a. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.10.043

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA approach for unified efficiency measurement: assessment of Japanese fossil fuel power generation. *Energy Economics*, v. 33, n. 2, p. 195-208, 2011b. DOI: 10.1016/j.eneco.2010.07.008

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Data envelopment analysis for environmental assessment: comparison between public and private ownership in petroleum industry. *European Journal of Operational Research*, v. 216, n. 3, p. 668-678, 2012a. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.07.046

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA radial measurement for environmental assessment and planning: desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants. *Energy Policy*, v. 41, p. 422-432, 2012b. DOI: 0.1016/j.enpol.2011.11.003

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Returns to scale and damages to scale under natural and managerial disposability: strategy, efficiency and competitiveness of petroleum firms. *Energy Economics*, v. 34, n. 3, p. 645-662, 2012c. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.07.003

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Environmental assessment by DEA radial measurement: U.S. coal-fired power plants in ISO (independent system operator) and RTO (regional transmission organization). *Energy Economics*, v. 34, n. 3, p. 663-676, 2012d. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.08.016

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA environmental assessment of coal fired power plants: methodological comparison between radial and non-radial models. *Energy Economics*, v. 34, n. 6, p. 1854-1863, 2012e. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.07.008

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Weak and strong disposability vs. natural and managerial disposability in DEA environmental assessment: comparison between Japanese electric power industry and manufacturing industries. *Energy Economics*, v. 34, n. 3, p. 686-699, 2012f. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.10.018

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Pitfalls and remedies in DEA applications: how to handle an occurrence of zero in multipliers by strong complementary slackness conditions. *Engineering*, v. 5, v. 5, p. 29-34, 2013. DOI: 10.4236/eng.2013.55A005

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. DEA radial measurement for environmental assessment: a comparative study between Japanese chemical and pharmaceutical firms. *Applied Energy*, v. 115, p. 502-513, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.014

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Environmental assessment on coal-fired power plants in U.S. northeast region by DEA non-radial measurement. *Energy Economics*, v. 50, p. 125-139, 2015. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.04.016

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Undesirable congestion under natural disposability and desirable congestion under managerial disposability in U.S. electric power industry measured by DEA environmental assessment. *Energy Economics*, v. 55, p. 173-188, 2016. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.01.004

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. *Environmental assessment on energy and sustainability by data envelopment analysis*. Oxford: John Wiley & Sons, 2018. 700 p.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; SHANG, J. Core business concentration vs. corporate diversification in the US electric utility industry: synergy and deregulation effects. *Energy Policy*, v. 37, n. 11, p. 4583-4594, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.06.013

SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; UENO, T. Performance analysis of U.S. coal-fired power plants by measuring three DEA efficiencies. *Energy Policy*, v. 38, n. 4, p. 1675-1688, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.11.017

SUEYOSHI, T.; LI, A.; GAO, Y. Sector sustainability on fossil fuel power plants across Chinese provinces: Methodological comparison among radial, non-radial and intermediate approaches under group heterogeneity. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 819-829, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.216

SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Social sustainability measured by intermediate approach for DEA environmental assessment: Chinese regional planning for economic development and pollution prevention. *Energy Economics*, v. 66, p. 154-166, 2017. DOI: 10.1016/j.eneco.2017.06.008

SUEYOSHI, T.; YUAN, Y.; GOTO, M. A literature study for DEA applied to energy and environment. *Energy Economics*, v. 62, p. 104-124, 2017. DOI: 10.1016/j.eneco.2016.11.006

WORLD BANK. *World Bank Data* (indicadores diversos relativos aos países). Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/>. Acesso em: 09 dez. 2018.

ZAIM, O. Measuring environmental performance of state manufacturing through changes in pollution intensities: a DEA framework. *Ecological Economics*, v. 48, n. 1, p. 37-47, 2004. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2003.08.003

ZHANG, N.; CHOI, Y. A comparative study of dynamic changes in CO2 emission performance of fossil fuel power plants in China and Korea. *Energy Policy*, v. 62, p. 324-332, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.07.060

ZHANG, X. P. *et al.* Total-factor energy efficiency in developing countries. *Energy Policy*, v. 39, n. 2, p. 644-650, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.10.037

ZHOU, H. *et al.* Data envelopment analysis application in sustainability: the origins, development and future directions. *European Journal of Operational Research*, v. 264, n. 1, p. 1-16, 2018. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.023

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy Economics*, v. 30, n. 1, p. 1-14, 2008. DOI: 10.1016/j.eneco.2006.05.001

Apêndice

Tabela A.1 – Resultados dos modelos de eficiência unificada dos países sob disposição natural e sob disposição gerencial (2014)

País	Disposição Natural		Disposição Gerencial	
	VRS	SEN	VDS	SEM
África do Sul	0,7783	0,8607	0,5909	0,7164
Albânia	1,0000	0,8137	1,0000	0,6546
Alemanha	1,0000	0,9248	1,0000	0,6225
Angola	0,7374	0,9898	1,0000	1,0000
Arábia Saudita	1,0000	1,0000	1,0000	0,8023
Argélia	0,8440	0,9896	0,9011	0,7403
Argentina	0,9713	0,9217	0,6118	0,8008
Armênia	1,0000	0,6972	0,8238	0,6381
Austrália	0,8018	0,7078	0,6504	0,5818
Áustria	0,9559	0,9835	0,7082	0,9727
Azerbaijão	0,7985	0,9950	0,7333	0,9992
Bahrain	0,8649	0,9971	0,7559	0,8746
Bangladesh	0,9719	0,8309	1,0000	0,7397
Belarus	0,6135	0,9976	0,4084	0,9912
Bélgica	1,0000	1,0000	0,7051	0,9099
Benin	0,7863	0,6187	0,5136	0,9381
Bolívia	0,6298	0,9397	0,4068	0,9872
Bósnia e Herzegovina	0,9785	0,9389	0,5506	0,7574
Botsuana	0,8966	0,8555	0,5864	0,8915
Brasil	1,0000	0,8087	1,0000	0,6245
Brunei	1,0000	1,0000	0,7920	0,7249
Bulgária	0,8889	0,9775	0,4382	0,9562
Camarões	0,9140	0,9875	0,9185	0,9972
Camboja	1,0000	0,9656	0,7562	0,9950
Canadá	0,7719	0,8101	0,7617	0,5817
Cazaquistão	0,7584	0,9996	0,4180	0,8275
Chile	0,8363	0,9990	0,7735	0,8672
China	1,0000	0,3494	1,0000	0,3841
Chipre	1,0000	1,0000	1,0000	0,5768
Colômbia	1,0000	0,8456	0,9132	0,8887
Congo	1,0000	0,8080	1,0000	1,0000
Coreia do Sul	1,0000	0,9542	0,8602	0,6371
Costa do Marfim	0,8449	0,9648	0,9057	0,9430
Costa Rica	1,0000	0,9175	1,0000	0,8876
Croácia	0,9360	0,9837	0,6362	0,9043
Dinamarca	0,9685	0,9948	0,7443	0,9941
Egito	1,0000	1,0000	0,8895	0,6925
El Salvador	1,0000	0,9287	0,9245	0,8043
Emir. Árabes Unidos	1,0000	0,9925	0,7470	0,8296
Equador	0,6867	0,9990	0,6618	0,9934
Eslováquia	1,0000	1,0000	0,6259	0,9471

País	Disposição Natural		Disposição Gerencial	
	VRS	SEN	VDS	SEM
Eslovênia	1,0000	1,0000	0,6916	0,8201
Espanha	1,0000	1,0000	0,9005	0,7444
Estados Unidos	1,0000	0,9170	1,0000	0,5353
Estônia	0,8089	0,8310	0,5394	0,6834
Filipinas	1,0000	0,8895	1,0000	0,7897
Finlândia	0,8044	0,9887	0,6921	0,9695
França	1,0000	1,0000	1,0000	0,8375
Gabão	1,0000	0,8708	0,8156	0,9891
Gana	0,7345	0,9888	1,0000	0,8295
Geórgia	0,7383	0,7623	0,7648	0,7348
Grécia	1,0000	1,0000	0,4870	0,9977
Guatemala	0,9864	0,9763	0,8016	0,9880
Holanda	0,9729	0,9716	0,8065	0,8341
Honduras	0,6766	0,8835	0,6567	0,8438
Hungria	0,9739	0,9983	0,6652	0,9898
Índia	1,0000	0,7659	1,0000	0,5789
Indonésia	1,0000	0,7354	1,0000	0,6660
Iraque	0,9094	0,9971	0,8876	0,7975
Irlanda	1,0000	1,0000	0,6597	0,9912
Israel	0,8155	0,9978	0,5479	0,9876
Itália	1,0000	1,0000	0,9166	0,7153
Jamaica	0,7888	0,7428	0,6521	0,6223
Japão	1,0000	0,9224	1,0000	0,5586
Jordânia	0,8270	0,9861	0,6229	0,8878
Lituânia	1,0000	1,0000	0,6595	0,9669
Luxemburgo	1,0000	1,0000	0,8792	0,7379
Macedônia	0,9999	0,7850	0,7353	0,6063
Malásia	0,9409	0,9451	0,6890	0,8033
Marrocos	0,7462	0,8668	0,6600	0,9077
México	1,0000	0,8374	0,9087	0,6537
Moçambique	0,7102	0,6181	0,5249	0,9718
Moldávia	1,0000	0,7556	0,9385	0,5574
Namíbia	1,0000	0,7106	0,7593	0,8142
Nepal	1,0000	1,0000	1,0000	0,9489
Nicarágua	0,9756	0,7443	0,7675	0,8825
Níger	1,0000	0,7875	1,0000	1,0000
Nigéria	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Noruega	1,0000	0,9132	1,0000	0,9472
Nova Zelândia	0,7510	0,9870	0,5677	0,9870
Omã	0,8773	0,9878	1,0000	0,9944
Panamá	1,0000	1,0000	0,9299	0,8562
Paquistão	1,0000	1,0000	0,8143	0,7241
Paraguai	1,0000	1,0000	1,0000	0,9794
Peru	0,9378	0,8412	0,9709	0,8843
Polônia	1,0000	0,8704	0,5854	0,7398
Portugal	1,0000	1,0000	0,6384	0,9984

País	Disposição Natural		Disposição Gerencial	
	VRS	SEN	VDS	SEM
Quênia	0,8718	0,9869	1,0000	1,0000
Quirguistão	0,7529	0,5493	0,7728	0,7047
Reino Unido	1,0000	0,9585	0,9569	0,6890
Rep. Dem. do Congo	1,0000	0,9878	1,0000	1,0000
Rep. Dominicana	0,9251	0,9921	0,7162	0,9550
Romênia	0,9446	0,9694	0,6308	0,9518
Rússia	1,0000	0,7485	1,0000	0,4311
Senegal	0,7677	0,8679	0,5623	0,9660
Sri Lanka	1,0000	1,0000	0,9742	1,0000
Suécia	0,9636	0,9996	1,0000	1,0000
Suíça	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Tailândia	0,9221	0,8486	0,6904	0,7691
Tajiquistão	0,9936	0,6368	0,7152	0,7360
Tanzânia	0,9226	0,9887	1,0000	1,0000
Togo	1,0000	0,6198	0,8549	0,9777
Tunísia	0,9128	0,9919	0,6141	0,9583
Turquia	1,0000	1,0000	0,8772	0,7101
Ucrânia	0,9597	0,9953	0,5021	0,7986
Uruguai	1,0000	0,9841	0,9017	0,9493
Venezuela	0,5964	0,9640	0,4956	0,8317
Vietnã	0,6867	0,9029	0,6648	0,7261
Zimbábue	1,0000	0,6912	0,5797	0,9643

Fonte: resultados da pesquisa.

* VRS: retornos variáveis; SEN: eficiência de escala; VDS: danos variáveis; SEM: eficiência de escala