

## ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS COM GANHOS DE SOMA ZERO NA MODELAGEM DE *OUTPUTS* INDESEJÁVEIS

**Eliane Gonçalves Gomes**

Embrapa Monitoramento por Satélite

Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803, Parque São Quirino, 13088-300, Campinas, SP

eliane@cnpm.embrapa.br

**Marcos Pereira Estellita Lins**

Programa de Engenharia de Produção - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 105, Ilha do Fundão, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ

lins@pep.ufrj.br

### Resumo

A avaliação de eficiência com modelos de Análise de Envoltória de Dados (DEA) de unidades que produzem *outputs* indesejáveis tem caracterizado uma particular linha de pesquisa em DEA. Situações em que existe um equilíbrio global dos *outputs* indesejáveis, embora comuns, não foram tratadas na literatura. Entretanto, os modelos DEA com Ganhos de Soma Zero (DEA-GSZ) recentemente desenvolvidos parecem adaptar-se particularmente a este tipo de problema, já que nestes modelos a soma das quantidades produzidas por todas as DMUs pode ser considerada como o limite máximo permitido em nível global. Este artigo traz a aplicação do modelo DEA-GSZ ao caso das emissões de dióxido de carbono, estudo que se insere no contexto do Protocolo de Kyoto.

**Palavras-chave:** Análise de Envoltória de Dados; Ganhos de Soma Zero; *Outputs* indesejáveis.

### Abstract

Performance assessment in the presence of undesirable outputs consists of a whole branch in DEA literature. We will focus the cases where global equilibrium of outputs should be imposed, situations not yet considered in literature. Zero Sum Gains DEA (ZSG-DEA) models look like specially adequate to treat equilibrium models, as in these models the sum of the quantities produced by all DMUs can be set as the upper admissible bound. This paper uses ZSG-DEA models to evaluate carbon dioxide emission case study, which can be considered part of the Kyoto Protocol statement.

**Keywords:** Data Envelopment Analysis; Zero Sum Gains; Undesirable outputs.

## 1. INTRODUÇÃO

Modelos de Análise de Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA) que contemplam a existência de produtos indesejáveis (por exemplo, poluentes), conhecidos na literatura DEA como *outputs* indesejáveis, têm recebido especial atenção nos últimos anos (Scheel, 2001), principalmente pela dinâmica econômico-ambiental na qual podem ser inseridos. *Outputs* indesejáveis são o resultado indesejável de um processo produtivo, ou seja, são aqueles produtos cuja produção deve ser minimizada.

A modelagem de *outputs* indesejáveis com modelos DEA pode ser feita segundo três abordagens principais, cuja escolha, segundo Dyckhoff e Allen (2001), é feita, frequentemente, de maneira arbitrária. Os mesmos autores discutem as vantagens e desvantagens dessas propostas.

A primeira abordagem usa o inverso do *output* indesejável como *output*, ou seja, o *output* indesejável é modelado como desejável ( $f(u_i^k) = 1/u_i^k$ , onde  $u_i^k$  é um elemento da matriz  $U$  de *outputs* indesejáveis  $i$  das DMUs  $k$ ). Essa abordagem é usada, por exemplo, por Lovell *et al.* (1995) e é conhecida como “multiplicativa inversa” (Golany e Roll, 1989; Scheel, 2001).

A segunda, que pode ser vista, por exemplo, em Rheinhard *et al.* (1999), usa DEA como ferramenta multicritério, ou seja, o *output* indesejável é tratado no modelo DEA como *input*. Neste

caso podem ser usados tanto o modelo DEA CCR quanto o BCC, dependendo das escalas de operação das unidades avaliadas. Como destacado por Scheel (2001), incorporar ao modelo *outputs* indesejáveis como *inputs* gera o mesmo conjunto de possibilidade de produção que incorporar os *outputs* indesejáveis como desejáveis, tomando-se a transformação  $f(U) = -U$  (transformação aditiva inversa).

Uma terceira possibilidade ao modelar *outputs* indesejáveis é transladar os valores (Ali e Seiford, 1990), o que significa adicionar à transformação aditiva inversa do *output* indesejável  $i$  um escalar positivo,  $\beta_i$ , suficientemente grande, de modo que os valores resultantes sejam positivos para cada DMU  $k$  ( $f(u_i^k) = -u_i^k + \beta_i$ ). Destaca-se, porém, que esta abordagem é válida somente para os modelos DEA BCC (Banker *et al.*, 1984) e Aditivo (Charnes *et al.*, 1985), já que o modelo CCR (Charnes *et al.*, 1978) não é invariante à translação (Cooper *et al.*, 2000).

Uma outra possibilidade, apresentada por Färe *et al.* (1996) e Färe e Grosskopf (2001), consiste em usar a hipótese de disponibilidade fraca, ou seja, assumir que a redução do *output* indesejável impõe aumento nas quantidades de *inputs* ou decréscimo nos valores dos *outputs* desejáveis. O desempenho ambiental é medido pela razão entre duas funções de distância: uma que inclui e outra que desconsidera o *output* indesejável. Dyckhoff e Allen (2001) destacam, entretanto, que esta proposta somente deve ser utilizada se o tomador de decisão estiver certo sobre as relações técnicas entre o *output* indesejável e certos *inputs* e *outputs*.

Os modelos DEA presentes na literatura consideram que os *outputs* indesejáveis podem ser reduzidos de forma independente, sem integração nem cooperação entre as unidades de produção. Este artigo propõe uma nova abordagem na modelagem de *outputs* indesejáveis, através dos modelos DEA com Ganhos de Soma Zero (DEA-GSZ), que consideram dependência de produção entre as unidades (*Decision Making Units* – DMUs) (Estellita-Lins *et al.*, 2003; Gomes, 2003; Gomes *et al.*, 2004, 2003a, 2003b; Gomes e Soares de Mello, 2002; Gomes *et al.*, 2001a). A restrição adicional deste modelo pode ser comparada a um jogo de soma zero, no qual tudo o que é ganho (ou perdido) por um jogador deve ser perdido (ou ganho) por algum outro(s), ou seja, a soma líquida dos ganhos deve ser zero.

Em Gomes (2003) encontra-se uma revisão do estado da arte sobre eficiência e produtividade quando da presença de *outputs* indesejáveis, com atenção especial aos trabalhos que usam DEA no cálculo da eficiência. Como referências importantes destacam-se Färe *et al.* (1989, 2000), Yaisawarng e Klein (1994), Lovell *et al.* (1995), Färe e Grosskopf (1995, 2004), Thanassoulis (1995), Tyteca (1996), Rheinhard (1999), Rheinhard *et al.* (1999, 2000), Scheel (2001), Hailu e Veeman (2001), Zofio e Prieto (2001), Dyckhoff e Allen (2001), Sun (2002), Seiford e Zhu (2002), Murtough *et al.* (2002), Kumar e Khanna (2002), Korhonen e Luptacik (2003).

Nos casos de análise de eficiência com a presença de *outputs* indesejáveis, modelos DEA-GSZ podem ser úteis na determinação de diretrizes para as unidades em avaliação, já que a soma das quantidades produzidas por todas as DMUs pode ser vista como o limite máximo permitido e, assim, não deve ultrapassado. Ou seja, qualquer DMU que busque a fronteira aumentando a quantidade desse *output* deverá impor a perda dessa quantidade pelas demais unidades produtoras (para que a soma líquida seja zero), o que provoca a redistribuição dessas quantidades, com base na eficiência, pelas unidades em avaliação. No caso de poluentes, por exemplo, o modelo DEA-GSZ teria inserção na linha da Economia Ecológica (Romeiro, 2002), que prevê definição de limites ou escalas para a emissão de poluentes e sua correta alocação.

Verifica-se que não há referências na literatura sobre a realocação de *outputs* indesejáveis de modo a manter o total inalterado ou sobre o comércio de cotas de poluentes. O estudo de caso deste artigo preenche esta lacuna, ao usar os modelos DEA-GSZ para propor um quadro sobre as trocas de emissões de CO<sub>2</sub> entre os países, segundo os “mecanismos flexíveis” do Protocolo de Kyoto.

## 2. MODELOS DEA COM GANHOS DE SOMA ZERO

Os modelos DEA clássicos, tanto o modelo CCR quanto o modelo BCC, além de todas as suas variantes, supõem total liberdade de produção, ou seja, a produção de uma DMU não interfere na produção das demais. Entretanto, em alguns casos essa liberdade não existe. No caso de competições, por exemplo, se for considerado como *output* o resultado final ou um índice que agrega seus

resultados (Soares de Mello *et al.*, 2001; Gomes *et al.*, 2001b), a melhora de posição de qualquer competidor implica na perda de posição de um ou mais de seus adversários.

Um outro exemplo é o caso da avaliação de eficiência de unidades produtivas que produzem um determinado produto cuja demanda é constante. Neste caso, uma certa DMU considerada ineficiente deverá produzir mais unidades do produto para atingir a fronteira de eficiência, com a conseqüente diminuição da produção das demais unidades produtivas.

Em Estellita-Lins *et al.* (2003), Gomes (2003), Gomes *et al.* (2004, 2003a, 2003b), Gomes e Soares de Mello (2002) e Gomes *et al.* (2001a) são propostas alterações no modelo DEA BCC clássico que consideram essas limitações; em Gomes (2003) e Gomes *et al.* (2004) apresenta-se a proposta de alteração para o modelo DEA CCR. Esses novos modelos, chamados de Modelos DEA com Ganhos de Soma Zero (DEA-GSZ), apresentam uma situação semelhante à de um jogo com soma zero (Osborne e Rubinstein, 1999), no qual tudo o que é ganho por um jogador é perdido por outro(s). Ou seja, a soma líquida dos ganhos deve ser zero.

Neste novo modelo, ao contrário do que acontece nos modelos tradicionais, o modo como uma DMU atinge seu alvo na fronteira, pode implicar na alteração da forma da fronteira eficiente. Em Gomes (2003) são propostas estratégias para a busca de alvos, destacando-se a estratégia de redução proporcional. Nesta estratégia, a DMU que busca eficiência (busca a fronteira) precisa ganhar determinadas unidades de *output* (*input*) e, para que a soma seja mantida constante, faz com que a perda das outras DMUs seja proporcional aos seus níveis de *output* (*input*), ou seja, quem tem menor nível de *output* (*input*) perde menos, quem tem maior nível de *output* (*input*) perde mais.

Em (1) apresenta-se o modelo DEA-GSZ CCR, orientado a *inputs*, para o caso de uma única DMU que busca eficiência e com um único *input* de soma constante. O modelo DEA-GSZ BCC é análogo, com a adição da restrição de convexidade  $\sum_j \lambda_j = 1$ . Neste modelo  $h_{Ro}$  é o inverso da eficiência da DMU  $o$  sob a condição de que a soma dos *inputs* seja constante;  $x_j$  e  $y_j$  são valores originais dos *inputs* e dos *outputs*, respectivamente;  $y_o$  e  $x_o$  são os valores de *outputs* e *inputs* para a DMU  $o$ ;  $\lambda_j$  são as contribuições das DMUs na projeção eficiente;  $\lambda_j$  e  $h_{Ro}$ .

$$\begin{aligned} & \text{Min } h_{Ro} \\ & \text{sujeito a} \\ & h_{Ro} x_o \geq \sum_j \lambda_j x_j \left[ 1 + \frac{x_o (1 - h_{Ro})}{\sum_{j \neq o} x_j} \right] \\ & \sum_j \lambda_j y_j \geq y_o \\ & \lambda_j \geq 0, \forall j \end{aligned} \tag{1}$$

A busca por eficiência pode ser feita não somente por uma única DMU, mas também por várias em regime de cooperação, o que conduz, no caso geral, a um problema de programação não linear multiobjetivo (Gomes, 2003; Gomes *et al.*, 2003a, 2003b).

Para obter a fronteira DEA uniformizada, as DMUs devem atuar em cooperação, sendo possível uma busca por alvos intermediários, de maneira seqüencial Gomes (2003) e Gomes *et al.* (2003a, 2003b). Entretanto, neste estudo de caso foi privilegiada a estratégia direta de busca de eficiência, ou seja, todas as DMUs que não pertencem à fronteira formam um grupo de cooperação e buscam eficiência diretamente na fronteira DEA eficiente.

O uso da estratégia de redução proporcional, conforme apresentado em Gomes (2003), Gomes *et al.* (2003a, 2003b), Estellita-Lins *et al.* (2003), Gomes e Soares de Mello (2002) e Gomes *et al.* (2001a), conduziu à proposição de teoremas que permitem que o modelo geral de programação não linear seja reduzido a um problema linear para o caso BCC; para o caso CCR, a estratégia de redução proporcional é obrigatória para que seja mantida a composição da fronteira eficiente, a menos da

DMU que busca a eficiência (Gomes, 2003; Gomes *et al.*, 2004). Além disso, com estratégia proporcional a resolução do problema de programação linear resume-se à solução de uma única equação linear, apresentada em (2), para o modelo DEA-GSZ CCR, orientado a *inputs*. Modelos análogos podem ser obtidos para a orientação a *outputs* e para modelos DEA-GSZ BCC (Gomes, 2003). Em (2),  $h_{Ri}$  e  $h_i$  são, respectivamente, as eficiências nos modelos DEA-GSZ CCR e DEA CCR clássico;  $W$  é o grupo de DMUs em cooperação;  $r_{ij} = h_i/h_j$  é o fator de proporcionalidade resultante do emprego da estratégia proporcional.

$$h_{Ri} = h_i \left( 1 + \frac{\sum_{j \in W} [x_j (1 - r_{ij} h_{Ri})]}{\sum_{j \in W} x_j} \right) \quad (2)$$

### 3. ESTUDO DE CASO: REDISTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

#### 3.1. Antecedentes

A intensificação do efeito estufa é bastante preocupante, já que é a principal causa do aquecimento global, isto é, do aumento da temperatura média do planeta. A causa desse aquecimento é consequência direta do aumento das emissões de gases de efeito estufa, em especial, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Esse aumento é provocado principalmente pelas atividades antrópicas, decorrentes especialmente da queima de combustíveis fósseis em usinas termelétricas (carvão, petróleo e gás natural), indústrias, veículos em circulação e sistemas domésticos de aquecimento, além de atividades agro-pastoris, lixões e aterros sanitários.

Em dezembro de 1997 foi firmado o Protocolo de Kyoto, para atingir o objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que propõe a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático (Lopes, 2002).

O Protocolo de Kyoto é um instrumento que tem como objetivo fazer com que os países industrializados (chamados “países do Anexo 1”) reduzam, e controlem, as suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990, até o período entre 2008 e 2012. Este critério utilizado é inadequado, porque não considera as diferentes características dos países com relação à eficiência ambiental. É comum, em se tratando de políticas inter e intra governamentais, postular-se a manutenção do *status quo*, aceitando-se os níveis relativos de produção, consumo ou emissões, como referência para novas regulamentações. Por exemplo, diante da necessidade de racionamento energético, as quotas individuais são estabelecidas com base no consumo histórico, e não em alguma avaliação das necessidades familiares ou empresariais. Tais políticas estão longe de serem socialmente justas.

Dado que o protocolo de Kyoto visa regular um fenômeno de escala planetária, o elemento chave a ser controlado é o nível de emissão global. As emissões particulares dos países podem ser flexibilizadas, condicionadas a um balanço global rígido. Assim, os países signatários poderão reduzir as suas emissões em nível doméstico e/ou terão a possibilidade de aproveitar os chamados “mecanismos flexíveis” para cumprir seus compromissos: Implementação Conjunta, Comércio de Emissões e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

O Comércio de Emissões prevê que como alguns países têm emissões abaixo do limite estabelecido pelo Protocolo (países não pertencentes ao Anexo 1), há a possibilidade que essa diferença seja coberta por um aumento na emissão de carbono pelas partes do Anexo 1. Dessa forma, haveria uma troca de cotas de emissão de carbono entre os dois grupos, sem alterar a emissão global. Já no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, os países emissores poderiam patrocinar projetos no outro grupo para reduzir ainda mais as emissões desse grupo e, com isso, aumentar suas emissões, de modo a não alterar a emissão global. Tudo isso é o que se chama “mercado de carbono”, cujo objetivo, segundo Belisário (2002), é aliviar o impacto na economia das partes do Anexo 1 e tornar viáveis os objetivos estabelecidos pelo Protocolo.

Nesse contexto, os modelos DEA serão utilizados para obter as quotas individuais diferenciadas, segundo as necessidades caracterizadas pelas dimensões demográfica e econômica dos

países, e os modelos DEA-GSZ para a proposição de um possível quadro sobre as trocas de cotas de carbono ou a realocação das emissões.

### 3.2 Modelagem

O objetivo do estudo de caso é estimar uma fronteira DEA eficiente que represente uma alocação “justa” de emissões de dióxido de carbono (*output* indesejável) em alguns países do mundo. Dessa forma, estar-se-ia contribuindo para os objetivos do Protocolo de Kyoto e do “mercado de carbono”, quais sejam, estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e/ou negociação de cotas de carbono que não alterem a emissão global.

Será admitido que essa concentração máxima de emissões é a soma das emissões de CO<sub>2</sub> em 2001 (dados mais recentes disponíveis). Entende-se, aqui, por alocação “justa” aquela com a qual todos os países são DEA eficientes (eficiência igual a 100%), ou seja, aquela que resulta em uma fronteira DEA uniformizada ou de “eficientização” máxima.

As variáveis utilizadas são população (em milhões de habitantes), consumo primário total de energia (em milhões de BTU), produto interno bruto (em bilhões de dólares) e emissões de CO<sub>2</sub> (em ton<sup>3</sup> de carbono equivalente).

Um modelo clássico de produção, como por exemplo, o modelo de Kumar e Khanna (2002), consideraria população e energia como *inputs*, PIB e emissões de CO<sub>2</sub> como *outputs* (desejável e indesejável, respectivamente). Esse modelo poderia apresentar algumas distorções, como a obtenção de eficiência 100% por países com baixíssimo consumo de energia ou nível populacional, pela atribuição de todo o peso da avaliação a essas variáveis (no modelo dos multiplicadores).

O modelo aqui proposto, dadas as limitações das variáveis disponíveis, pretende não apenas reconhecer o direito de um país a um nível de emissões em função de sua produção econômica (expressa pelo PIB), ou mesmo de sua *proxi* (dada pelo consumo de energia), mas também em função da população. A oferta e, indiretamente, a demanda por energia condicionam o nível de emissões, dada uma tecnologia de geração. Porém, países com uma grande população e desenvolvimento econômico moderado, como a China e a Rússia, não podem ser penalizados diante de outros países com populações menores.

Dessa forma, o modelo proposto neste estudo de caso sugere que, de modo simplificado, para países que tenham o mesmo valor de emissão de CO<sub>2</sub>, aquele com maior população, maior consumo de energia e/ou maior PIB seja mais eficiente. Alternativamente, para aqueles que tenham valores de população, energia consumida e PIB semelhantes, será mais eficiente o que emitir menos. Logo, população, energia consumida e PIB são modelados como *outputs* e as emissões de CO<sub>2</sub> como *output* indesejável.

O uso de somente dados sobre emissões de CO<sub>2</sub> como *output* indesejável justifica-se pelo fato de essas emissões representarem 85% das emissões dos gases do efeito estufa, conforme destacado por Egydio (2003). Os dados utilizados sobre as emissões de CO<sub>2</sub> são daquelas provenientes do consumo de petróleo, gás natural e carvão (EIA, 2003).

As DMUs do modelo DEA são os países signatários do Protocolo de Kyoto, incluindo-se aqueles chamados “países do Anexo 1” (países desenvolvidos, responsáveis por 55% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>). Essas informações foram obtidas em UNFCCC (2003) e totalizam 84 países. Para 20 desses (3 deles do Anexo 1 do Protocolo), não havia informação disponível sobre alguma das variáveis e foram descartados da análise, restando um total de 64 DMUs.

Os valores de cada variável para cada DMU foram obtidos em EIA (2003). Os dados de população, consumo de energia, PIB e emissões de CO<sub>2</sub> são do ano 2001 (os mais recentes disponíveis). Assim, verificar-se-á quais países nessas condições são eficientes e qual seria melhor alocação do *output* indesejável, ou seja, como as emissões deveriam ser redistribuídas (mantendo-se o total constante), para que todos os países fossem DEA eficientes.

Dentre as abordagens já mencionadas para o tratamento de *outputs* indesejáveis, as mais usadas na literatura são a que considera *output* indesejável como *input* e a que usa o inverso do *output* indesejável como *output*. Conforme já destacado, a escolha de uma dessas abordagens é arbitrária e, assim, optou-se pela abordagem que modela o *output* indesejável como *input* já que, além de ser a mais intuitiva e a que representa melhor a lógica causal do modelo de avaliação proposto, o uso do

inverso do *output* faria com que fosse imposta a restrição de soma constante aos inversos das emissões, dificultando a interpretação e operação destes resultados .

Além da escolha de variáveis e DMUs, a modelagem DEA requer a escolha do modelo, tanto segundo a orientação, quanto aos retornos de escala. Neste estudo de caso, foram privilegiados tanto o modelo DEA CCR quanto o BCC, de modo a possibilitar um quadro mais abrangente sobre o possível comércio de cotas de carbono.

Logo, os modelos DEA-GSZ CCR e BCC, orientados a *inputs*, são compostos de 64 DMUs, um *input* (emissões de CO<sub>2</sub>) e três *outputs* (população, energia consumida e PIB).

Para obter a fronteira DEA uniformizada, as DMUs devem atuar em cooperação, sendo aqui privilegiada a estratégia direta de busca de eficiência, ou seja, todas as DMUs que não pertencem à fronteira formam um grupo de cooperação e buscam eficiência diretamente na fronteira DEA eficiente.

### 3.3 Resultados

Para o cálculo da fronteira uniformizada com o modelo DEA-GSZ, a 1ª etapa é obter as eficiências DEA clássicas. As eficiências clássicas para os modelos DEA CCR e BCC, orientados a *inputs*, com 1 *input* e 3 *outputs*, foram obtidas com o uso do *software* SIAD (Angulo-Meza *et al.*, 2003). (Os dados utilizados e os resultados completos podem ser obtidos com os autores, já que por limitação de espaço não puderam ser incluídos neste artigo).

Verifica-se que no modelo CCR 4 DMUs são 100% eficientes: Noruega, Suécia, Suíça e Zâmbia. No modelo BCC 12 DMUs são eficientes: Brasil, China, Estados Unidos, França, Indonésia, Japão, Maldivas, Noruega, Suécia, Suíça, Vietnã e Zâmbia. No modelo CCR, as unidades eficientes contribuem com 0,73% para o total de emissões e no modelo BCC, com 57,2%. As eficiências médias nos modelos CCR e BCC foram 47,0% e 63,1%, respectivamente. As DMUs DEA ineficientes formam, para ambas as modelagens, o grupo de cooperação no paradigma DEA-GSZ.

Uma análise complementar pode ser feita a partir das Figuras 1, 2 e 3 e dos resultados completos dos modelos DEA CCR e BCC (pesos, folgas e *benchmarks*). As figuras trazem as relações entre o *input* e cada um dos *outputs*, ou seja, representam fronteiras DEA parciais. Nelas, a linha contínua representa a fronteira CCR, e a tracejada, a BCC, e é possível verificar as relações causais expostas em discutidas anteriormente.

Na Figura 1, por exemplo, analisando-se as DMUs França e Ucrânia nota-se que como a Ucrânia consumiu menos energia que França, mas gerou valor de emissões semelhante, a DMU França é mais eficiente que Ucrânia, considerando que ambos atribuíram peso predominante ao *output* energia, na maximização da eficiência, tanto no modelo CCR quanto no BCC. Situação similar acontece comparando-se França e Reino Unido: o consumo de energia é próximo, porém a DMU Reino Unido poluiu mais, o que provoca um valor de eficiência menor que o da DMU França, em ambos os modelos DEA (CCR e BCC). Análises semelhantes para outras DMUs.

De posse do valor das eficiências clássicas, obtêm-se os novos alvos, com a redistribuição do *output* indesejável “emissões de CO<sub>2</sub>” para ambos os modelos implementando-se o modelo DEA-GSZ.

Dados os valores de população, PIB e consumo de energia, os valores das emissões de CO<sub>2</sub> realocadas a cada DMU geram fronteiras DEA CCR e BCC uniformizadas ou de “eficientização máxima”, ou seja, todas as DMUs têm eficiência 100%. Para exemplificar, as Figuras 4, 5 e 6 representam as relações do *input* com cada *output* antes e após a redistribuição, segundo o modelo DEA-GSZ BCC.

Dessas figuras, nota-se um padrão de comportamento semelhante em ambas as situações, antes e após a redistribuição. Cabe destacar que após a redistribuição, conforme já explicitado, todas as DMUs têm eficiência 100%. Entretanto, nem todas são Pareto eficientes, como mostram os resultados das “folgas”, tanto para o caso CCR quanto para o BCC..

Tomando-se as DMUs Alemanha, Itália e México, por exemplo, observa-se que somente a DMU Alemanha pertence à fronteira DEA BCC após a redistribuição, já que pertence a uma das fronteiras parciais (Figura 4) e tem folgas zero para todas as variáveis. Já as DMUs México e Itália são 100% eficientes; porém, podem ainda melhorar o valor de alguma das variáveis (folgas diferente de zero).

Destaca-se que análises análogas podem ser feitas para outras DMUs e para o caso dos modelos que consideraram retornos constantes de escala.

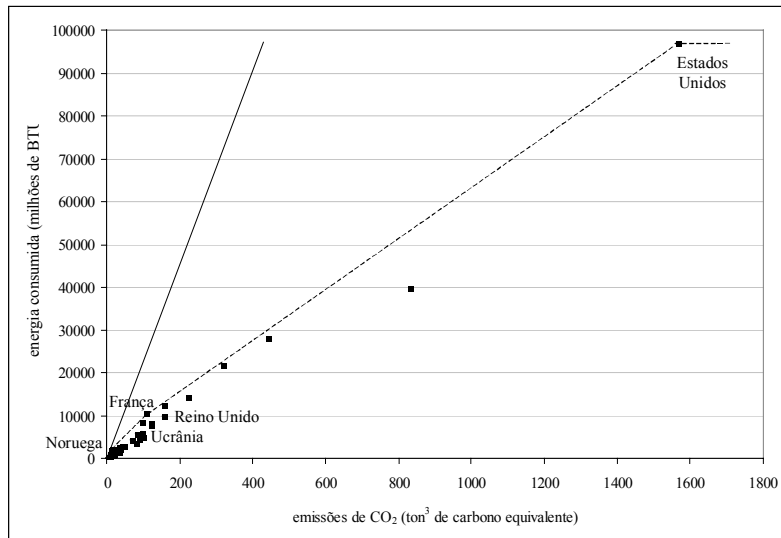


Figura 1: Emissões de CO<sub>2</sub> X Consumo de energia.

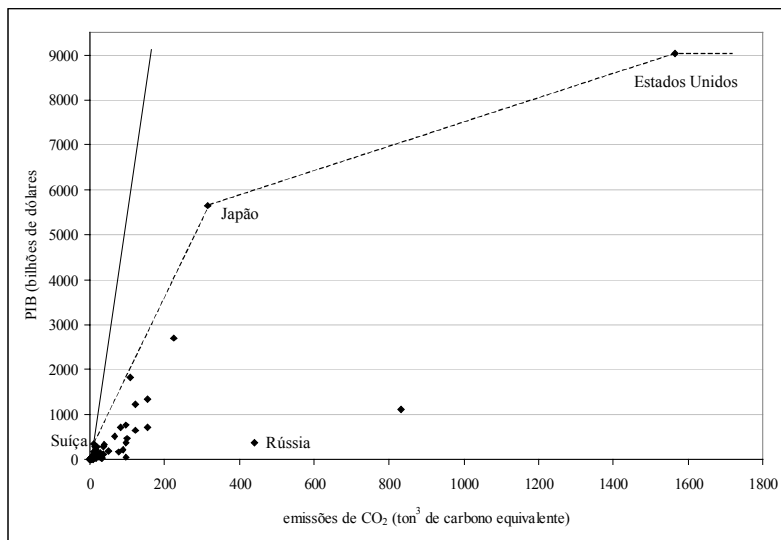


Figura 2: Emissões de CO<sub>2</sub> X Produto interno bruto.

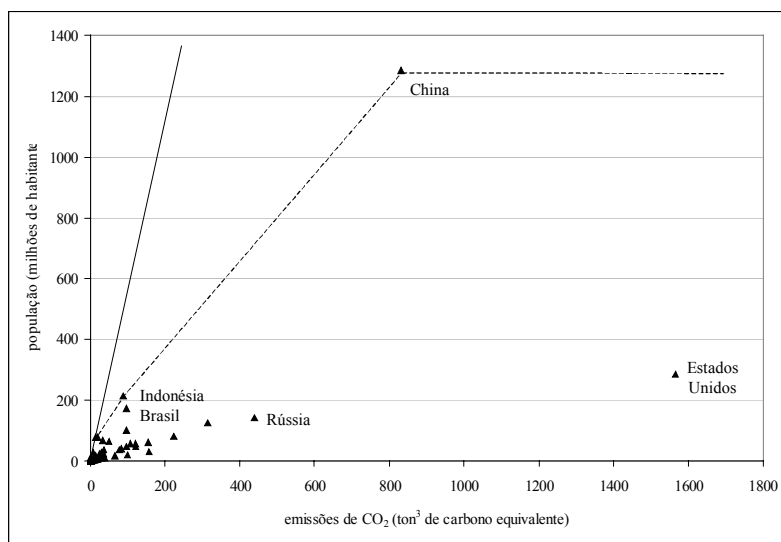


Figura 3: Emissões de CO<sub>2</sub> X População.

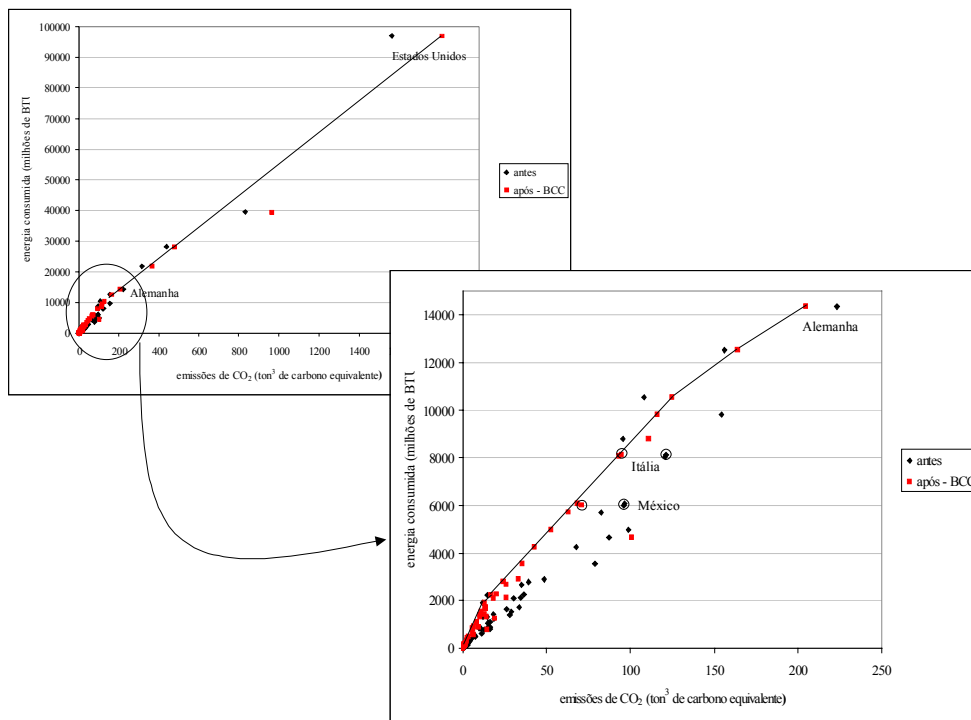


Figura 4: Emissões de CO<sub>2</sub> X Energia consumida, antes e após a redistribuição, segundo o modelo DEA-GSZ BCC.

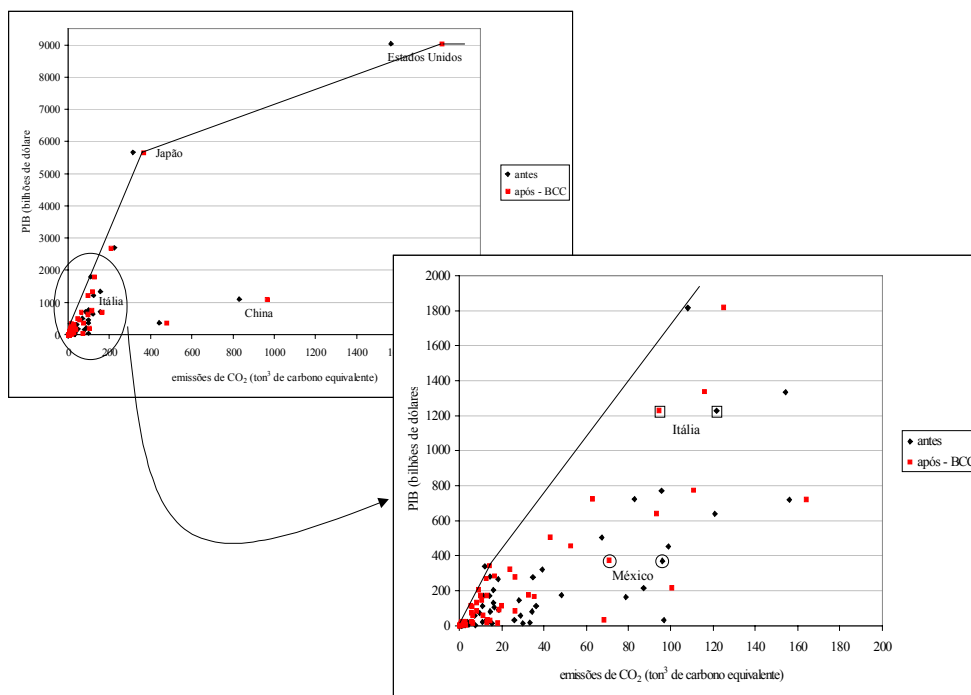


Figura 5: Emissões de CO<sub>2</sub> X Produto interno bruto, antes e após a redistribuição, segundo o modelo DEA-GSZ BCC.



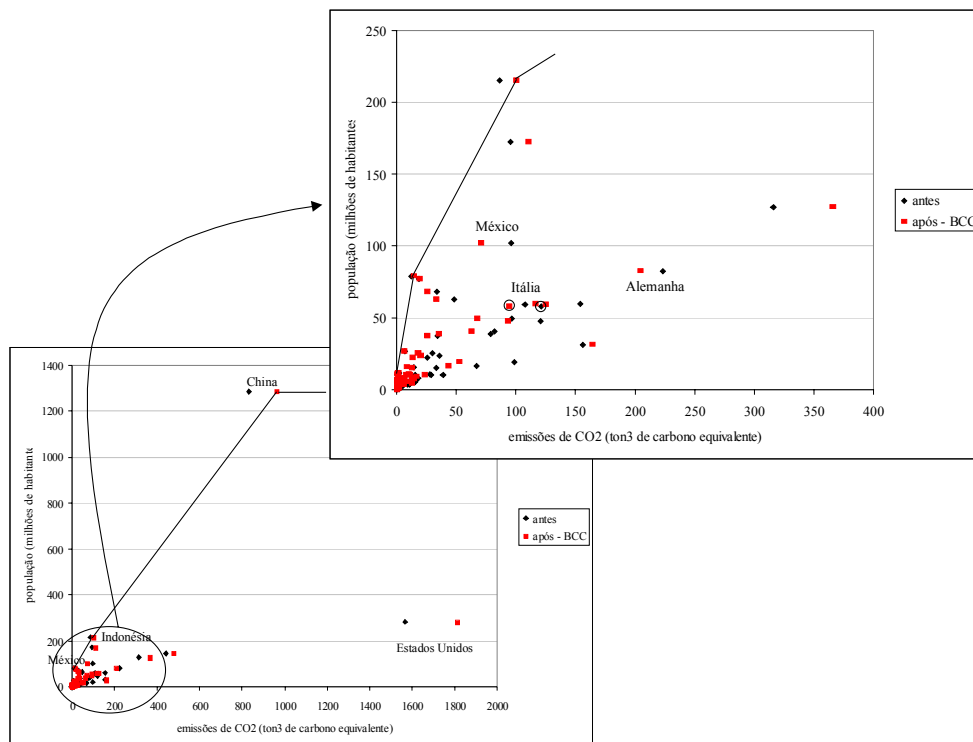


Figura 6: Emissões de CO<sub>2</sub> X População, antes e após a redistribuição, segundo o modelo DEA-GSZ BCC.

De modo geral, os resultados dos modelos DEA-GSZ servem como indicação para o processo de negociação de cotas. Verifica-se que para que alguns “países do Anexo 1” do Protocolo de Kyoto sejam DEA-GSZ eficientes, é permitido aumentar o valor de suas emissões, em especial quando da adoção do modelo DEA CCR. Em contrapartida, a outros países (em especial aos não pertencentes ao Anexo 1) é imposta a redução.

Como exemplo, a DMU Estados Unidos pode aumentar suas emissões segundo o modelo DEA-GSZ BCC. Já o modelo DEA-GSZ CCR privilegia os países que se encontram em uma escala ótima de operação e penaliza que operam em escala superior ou inferior. Segundo este modelo, os Estados Unidos deveriam reduzir suas emissões. Os Estados Unidos poderiam buscar parceiros que reduzam suas emissões, e até mesmo incentivá-los nesse processo, de modo a manter a emissão global inalterada.

Tabela 1: Realocação das emissões (expresso em ton<sup>3</sup> de carbono equivalente) para alguns países segundo os modelos DEA-GSZ.

DMU	Emissões (original)	CCR		BCC	
		Emissões (redistribuição)	Percentual de alteração	Emissões (redistribuição)	Percentual de alteração
Brasil	95,77	131,05	36,83	110,88	15,78
Estados Unidos	1565,31	1435,94	-8,26	1812,33	15,78
Reino Unido	154,33	162,98	5,61	116,23	-24,68

Situação semelhante ocorre com Reino Unido e Brasil (Tabela 1), que segundo o modelo adotado, devem reduzir ou negociar o aumento de suas emissões. A DMU Brasil, por exemplo, que era eficiente no modelo BCC clássico, poderá aumentar o valor de suas emissões segundo o modelo DEA-GSZ, significando que ainda com este aumento será eficiente e, portanto, poderá vender sua cota em excesso. Já o Reino Unido deverá reduzir suas emissões ou comprar cotas. Desta forma, pode-se estabelecer um processo de troca de cotas, já que aqueles países que possam aumentar suas emissões deveriam incentivar a redução de emissões nos demais.

Os resultados da aplicação dos modelos DEA-GSZ podem ser vistos como dois extremos. Os resultados do modelo DEA-GSZ CCR seriam os propostos por uma posição “mais benevolente” de adequação das emissões, já que o aumento de emissões é permitido a mais da metade da amostra avaliada e as reduções são, na maioria, inferiores às propostas pelo modelo DEA-GSZ BCC. Já os resultados deste seriam o extremo “menos benevolente”, pois o aumento de emissões é alocado somente aos países DEA BCC eficientes e a mais três inicialmente ineficientes. Sugere-se, portanto, que o processo de negociação do mercado de carbono possa ser conduzido entre esses dois limites.

#### 4. CONCLUSÕES

O modelo DEA aplicado à regulação de quotas de emissão, objetivo principal do protocolo de Kyoto, introduz uma característica importante, ao propor um modelo conceitual que supera a simples manutenção do *status quo*.

O modelo DEA-GSZ apresenta uma inovação teórica bastante apropriada ao conceito de mecanismos flexíveis: o cenário referencial para a redistribuição de emissões, garantindo a eficiência global. Além da alternativa que contempla os rendimentos variáveis de escala, foi considerada também a hipótese de rendimentos constantes de escala.

A modelagem de outputs indesejáveis com modelos DEA-GSZ preenche uma lacuna na literatura no que se refere à possibilidade de realocação desses valores entre as unidades avaliadas de modo a obter uma “alocação ótima”. O modelo proposto deve ser visto como um primeiro resultado para a estimativa de uma fronteira uniformizada, com base na redistribuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Modelos mais avançados devem ser desenvolvidos, como por exemplo, com adição de restrições aos pesos das variáveis de *output*.

A obtenção de uma fronteira uniformizada, ou de “eficientização” máxima, mostra as possibilidades do modelo DEA-GSZ no apoio à decisão, em especial, na emissão de diretrizes às unidades produtivas para comportamentos futuros. Dessa forma, os resultados deste estudo de caso, em especial no que se refere à redistribuição das cotas de emissão de CO<sub>2</sub>, representam uma referência para negociações baseadas em critérios técnicos e que reflitam uma justa alocação de responsabilidades, sem considerar aspectos puramente comerciais e/ou políticos.

O estudo da modelagem de *outputs* indesejáveis suscitou dois direcionamentos para desenvolvimento de pesquisas futuras. A primeira possibilidade é usar os outros gases do efeito estufa como *outputs* indesejáveis. Nesse caso, o modelo DEA-GSZ deve incorporar restrições aos pesos, já que cada poluente tem uma importância diferenciada para o efeito estufa. Para a correta modelagem, esse desenvolvimento deverá integrar os modelos DEA-GSZ e Multicritério. O segundo direcionamento refere-se ainda à adição de restrições aos pesos, mas neste caso, os limites de variação dos pesos deverão ser impostos às variáveis usadas no estudo de caso como *output*.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A.I.; Seiford, L.M. Translation invariance in data envelopment analysis. *Operations Research Letters*, v. 9, p. 403-405, 1990.
- Angulo-Meza, L.; Biondi Neto, L.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Gomes, E.G.; Coelho, P.H.G. SIAD - Sistema Integrado de Apoio à Decisão: uma implementação computacional de modelos de Análise Envoltória de Dados. *Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção*, v. 3, n. 20, 2003. Disponível em: <[http://www.producao.uff.br/rpep/relpesq303/relpesq\\_303\\_20.doc](http://www.producao.uff.br/rpep/relpesq303/relpesq_303_20.doc)>. Acesso em: 20 dez. 2003.
- Banker, R.D.; Charnes, A.; Cooper, W.W.; Some models for estimating technical scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.
- Belisário, R. *34 anos de negociações: das boas intenções à fria realidade*. 2002. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/clima/clima03.htm>>. Acesso em: 19 nov. 2003.
- Charnes, A.; Cooper, W.W.; Golany, B.; Seiford, L.M.; Stutz, J. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions”, *Journal of Econometrics*, v. 30, n. 12, p. 91-127, 1985.
- 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.

- Cooper, W.W.; Seiford, L.M.; Tone, K. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Kluwer Academic Publishers, USA, 2000.
- Dyckhoff, H.; Allen, K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA). *European Journal of Operational Research*, v. 132, n. 2, p. 312-325, 2001.
- Egydio, R. *MDL ou Mercado de Carbono para atingir as metas do Protocolo de Kioto*. 2003. Disponível em: <[http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/091003\\_carbono.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/091003_carbono.htm)>. Acesso em: 10 out. 2003.
- EIA. *U.S. Energy Information Administration Homepage*. 2003. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/>>. Acesso em: 15 set. 2003.
- Estellita Lins, M.P.; Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Soares de Mello, A.J.R. Olympic ranking based on a Zero Sum Gains DEA model. *European Journal of Operational Research*, v. 148, n. 2, p. 312-322, 2003.
- Färe, R.; Grosskopf, S. Environmental decision models with joint outputs. *Economics Working Paper Archive*, Economic Department, Washington University, US, 1995.
- Färe, R.; Grosskopf, S. *Optimization models applied to productivity and the environment*. XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos do Jordão, SP, Novembro, 19 p., 2001.
- Färe, R.; Grosskopf, S. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation: comment?, *European Journal of Operational Research*, v. 157, p. 242-245, 2004.
- Färe, R.; Grosskopf, S.; Lovell, C.A.K.; Pasurka, C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, v. 71, n. 1, p. 90-98, 1989.
- Färe, R.; Grosskopf, S.; Tyteca, D. An activity analysis model of environmental performance of firms – application to fossil-fuel-fired electric utilities. *Ecological Economics*, v. 18, p. 161-175, 1996.
- Färe, R.; Grosskopf, S.; Zaim, O. An index number approach to measuring environmental performance: an environmental Kuznets curve for OECD countries. *New Zealand Econometrics Study Group Meeting*, University of Canterbury, NZ, 2000.
- Golany, B.; Roll, Y. An application procedure for DEA. *Omega – The International Journal of Management Science*, v. 17, p. 237-250, 1989.
- Gomes, E.G. *Modelos de Análise de Envoltória de Dados com Ganhos de Soma Zero*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B. Determinação de alvos em modelos DEA com ganhos de soma zero In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2002, Rio de Janeiro. *Anais...*, 2002.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Estellita Lins, M.P. Modelos DEA com soma de *outputs* constante. In: XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2001, Campos do Jordão. *Anais...*, 2001a.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Estellita Lins, M.P. Uso de Análise de Envoltória de Dados e Auxílio Multicritério à Decisão na análise de dados das Olimpíadas 2000. In: XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2001, Salvador. *Anais...*, 2001b.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Estellita Lins, M.P. Busca seqüencial de alvos intermediários em modelos DEA com soma de *outputs* constante. *Investigação Operacional*, v. 23, n. 2, p. 1-16, 2003a.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Estellita Lins, M.P. Deslocamento de DMUs pela fronteira de eficiência em modelos de Análise de Envoltória de Dados com Ganhos de Soma Zero. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2003, Natal. *Anais...*, 2003b.
- Gomes, E.G.; Soares de Mello, J.C.C.B.; Estellita Lins, M.P. Modelos de Análise de Envoltória de Dados com Ganhos de Soma Zero e Retornos Constantes de Escala. In: 11º Congresso da Associação Portuguesa de Investigação Operacional, 2004, Porto. *Actas...*, 2004.
- Korhonen, P.; Syrjänen, M. Resource allocation based on efficiency analysis. *Working Paper W-293*, Helsinki School of Economics and Business Administration, 25 p., 2001.
- Kumar, S.; Khanna, M. Productivity growth and CO<sub>2</sub> abatement: a cross-country analysis using the distance function approach. *International Conference on Climate Change and Environmental Policy*, University of Illinois, US, 2002.

- Lovell, C.A.K.; Pastor, J.T.; Turner, J.A. Measuring macroeconomic performance in the OECD: A comparison of European and non-European countries. *European Journal of Operational Research*, v. 87, n. 3, p. 507-518, 1995.
- Murtough, G.; Appels, D.; Matysek, A.; Lovell, C.A.K. Why greenhouse gas emissions matter when estimating productivity growth: an application to Australian electricity generation. In: 2<sup>nd</sup> World Congress of Environmental and Resource Economists, Monterey, California, US. *Proceedings...*, 2002.
- Lopes, I.V. *O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: guia de orientação*. Rio de Janeiro, Fundação Getúlio Vargas, 90 p., 2002.
- Osborne, M.J.; Rubinstein, A. *A Course in Game Theory*. The MIT Press, Boston, USA, 1999.
- Rheinhard, S. *Econometric analysis of economic and environmental efficiency of Dutch dairy farms*. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, 1999.
- Rheinhard, S.; Lovell, C.A.K.; Thijssen, G. Econometric estimation of technical and environmental efficiency: an application to Dutch dairy farms. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 81, n. 1, p. 44-60, 1999.
- Rheinhard, S.; Lovell, C.A.K.; Thijssen, G. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables estimated with SFA and DEA. *European Journal of Operational Research*, v. 121, p. 287-303, 2000.
- Romeiro, A.R. *Fundamentos da economia ecológica*. Comunicação pessoal, Outubro, 2002.
- Scheel, H. Undesirable outputs in efficiency evaluations. *European Journal of Operational Research*, v. 132, p. 400-410, 2001.
- Seiford, L.M.; Zhu, J. Modeling undesirable outputs in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, v. 142, p. 16-20, 2002.
- Soares de Mello, J.C.C.B.; Gomes, E.G.; Estellita Lins, M.P.; Soares de Mello, A.J.R. Uso da Pesquisa Operacional em esportes: o caso das Olimpíadas. *Boletim da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional*, n. 19, p. 5-6, 2001.
- Sun, S. Measuring the relative efficiency of police precincts using data envelopment analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 36, p. 51-71, 2002.
- Thanassoulis, E. Assessing police forces in England and Wales using Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 87, p. 641-657, 1995.
- Tyteca, D. On the measurement of the environmental performance of firms – a literature review and a productivity efficiency perspective. *Journal of Environmental Management*, v. 46, p. 281-308, 1996.
- UNFCCC. *The Convention and the Kyoto Protocol, United Nations Framework Convention on Climate Change*. 2003. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/convkp.html>>. Acesso em: 10 out. 2003.
- Yaisawarng, S.; Klein, J.D. The effects of sulfur dioxide controls on productivity change in the U.S. electric power industry. *The Review of Economics and Statistics*, v. 76, n. 3, p. 447-460, 1994.
- Zofio, J.L.; Prieto, A.M. Environmental efficiency and regulatory standards: the case of CO<sub>2</sub> emissions from OECD industries. *Resource and Energy Economics*, v. 23, p. 63-83, 2001.