n.11

Texto para Discussão

Fundação João Pinheiro

Evolução da intensidade de emissões de carbono na economia do estado de Minas Gerais, 2005-2013

Marco Paulo Vianna Franco
Carla Cristina Aguilar de Souza
Raimundo de Sousa Leal Filho
Reinaldo Carvalho de Morais

Versão preliminar

Belo Horizonte, novembro de 2018

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO
GOVERNO DE MINAS GERAIS

TEXTO PARA DISCUSSÃO n.11

Versão preliminar

Evolução da intensidade de emissões de carbono na economia do estado de Minas Gerais, 2005-2013

Marco Paulo Vianna Franco*

Carla Cristina Aguilar de Souza**

Raimundo de Sousa Leal Filho***

Reinaldo Carvalho de Morais****

* Pesquisador em Ciência e Tecnologia da FJP (marco.franco@fjp.mg.gov.br)

** Pesquisadora em Ciência e Tecnologia da FJP (carla.aguilar@fjp.mg.gov.br)

*** Pesquisador em Ciência e Tecnologia da FJP (raimundo.leal@fjp.mg.gov.br)

**** Especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental da FJP (reinaldo.morais@fjp.mg.gov.br)

Belo Horizonte

Novembro de 2018

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO
GOVERNO DE MINAS GERAIS

MINAS GERAIS
GOVERNO DE TODOS

TEXTO PARA DISCUSSÃO

São textos que visam divulgar trabalhos preliminares desenvolvidos pela FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Possuem o objetivo de compartilhar ideias e obter comentários, críticas e sugestões refletindo exclusivamente a opinião dos autores.

Todos os direitos reservados.
É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, por qualquer meio, desde que citada a fonte.
Disponível também em: <http://www.fjp.mg.gov.br>

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO

Alameda das Acácias, 70 – Bairro São Luiz – Pampulha
Belo Horizonte – Minas Gerais
CEP 31275.150
Telefones: (31) 3448-9580 e 3448-9561
www.fjp.mg.gov.br - e-mail: comunicacao@fjp.mg.gov.br

Resumo:

O trabalho teve como objetivo avaliar a evolução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa na economia do Estado de Minas Gerais a partir da queima de combustíveis entre os anos de 2005 e 2013. Para tanto, foi utilizado um modelo insumo-produto aberto de Leontief com unidades híbridas e incorporação de um setor energético, com base nas matrizes de insumo-produto estaduais de 2005, 2008 e 2013 e nos dados energéticos disponíveis no Balanço Energético do Estado de Minas Gerais. De forma geral, os resultados apontaram que os setores "transporte, armazenagem e correio", "fabricação de derivados do petróleo e álcool", "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos", "metalurgia" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" mantiveram-se como os mais relevantes no período em termos de emissões. Os mesmos setores apresentaram também as maiores quantidades de emissões embutidas nas exportações internacionais por unidade monetária de venda.

Palavras-chave:

Insumo-Produto, Emissão de Gases de Efeito Estufa; Setores-Chave; Exportações; Minas Gerais.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 05

2 REFERENCIAL TEÓRICO 08

3 METODOLOGIA 11

3.1 Matrizes de Insumo-Produto em Unidades Híbridas 11

3.2 Impactos setoriais e setores-chave nas emissões do Estado 13

3.3 Emissões incorporadas nas Exportações 15

4 PREPARAÇÃO DAS BASES DE DADOS 16

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 18

5.1 Requerimentos totais de emissões 18

5.2 Setores-chave nas emissões 19

5.3 Emissões incorporadas nas exportações 22

6 CONCLUSÃO 25

7 REFERÊNCIAS 27

1 INTRODUÇÃO

Em um contexto científico, já não cabe disputa acerca do caráter antropogênico da elevação das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e suas consequências irreversivelmente catastróficas à perpetuidade da vida humana e não-humana no planeta (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009). Além da "extinção de espécies animais e vegetais, alteração na frequência e intensidade de chuvas (...), elevação do nível do mar e intensificação de fenômenos meteorológicos (por exemplo: tempestades severas, inundações, vendavais, ondas de calor, secas prolongadas) " (INPE, 2011), incluem-se entre os efeitos econômicos mais nocivos das mudanças climáticas rupturas na oferta de recursos hídricos, na geração de energia e na produtividade agrícola. A menor capacidade tecnológica e financeira de resposta e adaptação a esses fenômenos em países em desenvolvimento torna-os especialmente vulneráveis aos seus efeitos. No caso do Brasil, os maiores danos socioambientais e econômicos dessas alterações compreendem:

> o agravamento da escassez de oferta hídrica no Nordeste semiárido; na Amazônia: perda de biodiversidade (extinção de espécies), substituição de florestas tropicais por savanas, desertificação e salinização de terras agricultáveis. O cenário de substituição de áreas florestais na Amazônia envolveria ainda a alteração do regime de chuvas nas regiões de produção agrícola situadas no Centro-Sul do País; e por fim, o aumento do nível do mar, com prejuízos às cidades costeiras. (COMISSÃO MISTA PERMANENTE SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2013, p. 8).

Em relação ao Estado de Minas Gerais e de acordo com FEAM (2015, p. 9), "(...) estima-se que desde 2008, eventos climáticos extremos como chuvas intensas e secas prolongadas tenham custado 12,8 bilhões de reais ao estado. Caso nada seja feito, os custos dos impactos para a economia mineira decorrentes das mudanças climáticas podem alcançar R$ 450 bilhões até 2050". Visando minimizar tais impactos, o Estado incluiu a elaboração de planos setoriais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e a realização de cenários tendenciais de emissões na sua principal ferramenta de planejamento, o Plano Plurianual de Ação Governamental (PPAG) 2012-2015 (MINAS GERAIS, 2011). Em 2015, foi criado o Comitê Político do Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais (PEMC-MG), cujo objetivo é acompanhar as revisões periódicas de aperfeiçoamento e a implantação das ações setoriais e transversais do PEMC-MG (MINAS GERAIS, 2015).

FEAM (2013) apresenta dados de emissões por setores e subsetores socioeconômicos do Estado de Minas Gerais para o ano de 2010. A emissão total foi igual a 123.434,3 Gg CO_2-e (gigagramas ou mil toneladas de dióxido de carbono equivalente), 0,6% a menos do que as estimativas obtidas para o ano de 2005, o que

representa uma estabilização das emissões, mesmo com o crescimento econômico observado no período[1]. A manutenção do nível de emissões é decorrente, principalmente, da grande redução do desmatamento e, consequentemente, das emissões associadas às mudanças no uso do solo, que nesse período se viram reduzidas em 82%, correspondendo a 13.742,7 Gg CO_2-e que deixaram de ser emitidos via conservação da cobertura vegetal do Estado.

As estimativas feitas por FEAM (2013) dividiram as emissões em cinco setores: agropecuário, energia, processos industriais, mudança de uso do solo e tratamento de resíduos. O setor agropecuário representou 39,3% do total de emissões, sendo que o subsetor da pecuária foi responsável por 60,6% e a agricultura por 39,4% deste montante. As emissões desse setor foram oriundas principalmente do processo de fermentação entérica do gado, manejo de dejetos animais, solos agrícolas, calagem, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas. A grande representatividade do setor pode ser explicada pela grande relevância da atividade agropecuária na economia mineira, com destaque para os rebanhos de bovinos e suínos.

O setor de energia foi o segundo maior setor emissor, contando com 36% das emissões, decorrentes da queima de combustíveis fósseis e biomassa na produção, transformação e consumo de energia, bem como de emissões fugitivas decorrentes do refino, transporte e distribuição de petróleo e gás natural. Desse total, 47,3% das emissões foram atribuídas ao subsetor de transportes e 38,6% ao subsetor industrial. Desagregando por tipo de combustível, os resultados apontaram que os consumos de óleo diesel e gasolina apresentaram as maiores participações, com respectivamente 36,9% e 13,9% das emissões do setor. No subsetor de transportes, o modal rodoviário foi responsável por 94,5% das emissões, com o óleo diesel perfazendo 67,1% e a gasolina 29,4% do total.

O setor de processos industriais representou 15,8% do total das emissões, resultantes dos processos produtivos das indústrias, excluindo-se a queima de combustíveis. O subsetor mais representativo foi o de minerais metálicos (53% do total setorial), que inclui a siderurgia e a produção de alumínio. O subsetor de minerais não metálicos também se destacou, principalmente em decorrência do peso da indústria cimenteira no Estado, com 46,7% do total setorial.

Emissões menos representativas foram associadas aos setores de mudança de uso do solo[2] e de tratamento de resíduos, que apresentaram respectivamente 2,5% e 6,4% do total de emissões. As emissões

[1] O crescimento do Estado de Minas Gerais entre 2005 e 2010 foi de aproximadamente 25%, segundo dados da Fundação João Pinheiro [FJP] (2012).

[2] A queda das taxas de desmatamento em Minas Gerais, assim como em outros Estados do Brasil e principalmente na Amazônia, contribuiu significativamente para a redução das emissões brasileiras nos últimos anos. Entretanto, as reduções provenientes desse setor estão próximas do seu limite de contribuição, visto que não haveria mais ganhos ao se atingir o "desmatamento zero", além do fato de que tais reduções ocorrem a taxas decrescentes. Portanto, apesar da pequena participação desse setor no

(e remoções, dada a possibilidade de fixação de carbono por meio do manejo de áreas florestais) contabilizadas no setor de mudança de uso do solo resultam do balanço de carbono apresentado – seja da biomassa aérea ou do solo – considerando-se as transições possíveis entre os diversos usos do solo. As emissões que compõem o setor de tratamento de resíduos, por sua vez, se originam da disposição e tratamento de resíduos, incluindo compostagem, incineração e tratamento de efluentes domésticos e industriais.

Entretanto, tais estimativas não levam em conta os encadeamentos intersetoriais, atendo-se a análises que abordam cada setor econômico separadamente. Estudos que desconsideram a dinâmica intersetorial pouco contribuem para o entendimento acerca da forma pela qual a estrutura produtiva gera impactos ambientais e como esse quadro evolui no tempo. As relações de oferta e demanda entre os setores agropecuário, de energia e de processos industriais, por exemplo, podem revelar aspectos importantes para a elaboração de políticas integradas de mitigação de emissões. De acordo com Carvalho *et al.* (2013), análises de insumo-produto constituem uma ferramenta apropriada de investigação de impactos ambientais devido à consideração dos elos entre os setores econômicos.

Nesse contexto, torna-se relevante a produção de informações cada vez mais detalhadas a respeito dos impactos da atividade econômica sobre o aquecimento global, tendo em vista a formulação de políticas públicas estaduais que possam atuar eficazmente na mitigação dos seus efeitos ou na adaptação a eles. Uma descrição minuciosa das relações entre a estrutura produtiva do Estado e as emissões por ela originadas, a partir de modelos de insumo-produto, permitiria a proposição de ações mitigatórias mais efetivas. Analisar a evolução dessas relações em um dado período pode, por conseguinte, oferecer uma avaliação mais adequada do cenário e uma compreensão mais abrangente dos desafios ainda por vir.

Assim, o trabalho teve como objetivo avaliar a evolução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa na economia do Estado de Minas Gerais a partir da queima de combustíveis entre os anos de 2005 e 2013. Pretendeu-se (i) mensurar os requerimentos totais de emissões dos 35 setores da economia mineira em relação a variações na demanda final; (ii) identificar os setores-chave em termos das emissões da economia estadual, entendidos como setores de especial interesse para a formulação de políticas públicas voltadas ao tema; e (iii) analisar a estrutura exportadora do Estado quanto à intensidade das emissões embutidas no seu comércio internacional. Para tanto, foi utilizado um modelo insumo-produto aberto de Leontief com unidades híbridas e incorporação de um setor energético, com base nas matrizes de insumo-produto estaduais de 2005, 2008 e 2013 e nos dados energéticos disponíveis no Balanço Energético do Estado de Minas Gerais (BEE-MG). A seção 2 aborda a literatura pertinente ao tema; a seção 3 descreve a metodologia utilizada; a seção 4 trata da preparação das bases de dados; a seção 5 expõe e discute os resultados obtidos e a última seção conclui o trabalho.

montante de emissões, vale ressaltar que a manutenção das baixas taxas de desmatamento é de grande relevância para o sucesso das atuais políticas de mitigação de emissões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A metodologia de análise de insumo-produto, desenvolvida por Leontief (1986), desvela as diferentes formas pelas quais um dado setor econômico interage com o resto da economia. De forma direta ou indireta, os efeitos de um setor podem se disseminar por toda a cadeia produtiva. Um estudo cuidadoso acerca das relações intersetoriais pode, portanto, indicar características da estrutura produtiva que auxiliem na elaboração de políticas públicas.

As aplicações de modelos de insumo-produto na área ambiental surgiram logo após o desenvolvimento da metodologia, com o próprio Leontief (1986, p. 241-293) tratando de impactos e externalidades ambientais, como a poluição do ar. Tais aplicações vêm se intensificando nas últimas décadas, resultado da deterioração dos problemas ambientais em nível planetário e da consequente demanda por mais informações e conhecimento que possam embasar novas políticas para um desenvolvimento ecologicamente sustentável (HAWDON; PEARSON, 1995).

Dentre as diversas aplicações ambientais de modelos de insumo-produto, destacam-se aquelas voltadas à análise dos fluxos energéticos nas economias[3]. Tais iniciativas se debruçam sobre questões relacionadas a políticas setoriais de abastecimento e eficiência energética, mudanças tecnológicas e de demanda, e à produção de análises mais gerais voltadas às relações entre desenvolvimento econômico e consumo de energia (*ALCÁNTARA*; *PADILLA*, 2003; *GOWDY; MILLER*, 1987; *PEROBELLI et al*., 2007).

Uma vertente de estudos específica dentre as análises dos fluxos energéticos nas economias aborda a crescente preocupação com as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa e seu efeito sobre o aquecimento global. A relação direta entre o consumo de combustíveis fósseis e os fluxos de energia pela economia[4] torna apropriado o uso de modelos de insumo-produto para melhor se compreender como se distribuem as emissões em uma dada economia e quais seriam os setores mais sensíveis a políticas mitigatórias. Exemplos internacionais desses estudos incluem *Proops et al.* (1993), *Gay* e *Proops* (1993), *Hetherington* (1996), *Lenzen* (1998), *Labandeira* e *Labeaga* (2002) e *Tacancón Morán* e *Del Río González* (2007). Para a economia brasileira, alguns dos estudos mais recentes são Machado (2002), Hilgemberg (2004), *Hilgemberg* e *Guilhoto* (2006), *Perobelli et al*. (2007), Carvalho e *Perobelli* (2009), Carvalho *et al*. (2013), *Perobelli et al*. (2015) e Vale *et al*. (2018).

[3] Uma breve história das aplicações energéticas de modelos de insumo-produto pode ser encontrada em *Hannon* (2010).
[4] De acordo com *Steffen et al.* (2007), cerca de 80% da energia total consumida pela economia global em 2000 teve como origem sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis.

Perobelli et al. (2007) analisaram as interações energéticas entre o Estado de Minas Gerais e o restante do Brasil usando um modelo inter-regional de insumo-produto com 13 setores, além da incorporação de um setor de energia. Nesse modelo, as vendas do setor de energia aos demais setores foram contabilizadas em unidades físicas de energia (toneladas de petróleo equivalente) e não monetárias, o que torna as matrizes do modelo "híbridas", já que apresentam alguns elementos em unidades monetárias e outros em unidades de energia. A partir de dados acerca do consumo de energia no Estado em 2003 e da matriz de insumo-produto de 1996, os autores constataram que "os setores econômicos dentro de Minas Gerais exercem maior pressão sobre o setor de energia do Estado do que os respectivos setores econômicos fora do Estado" (p. 127). Os autores identificaram os setores "Ferro e Aço", "Transporte", "Energético" e "Outras Indústrias" como as maiores fontes de pressão provenientes de dentro do Estado sobre a demanda incidente sobre o setor de energia; os setores "Energético", "Transporte", "Outras Indústrias" e "Alimentos e Bebidas" se destacaram como fontes de pressão advindas do restante do país.

Carvalho *et al*. (2013) computaram as intensidades das emissões no Estado de Minas Gerais para o ano de 2005 por meio de um modelo de insumo-produto híbrido regional com 35 setores. Os autores identificaram como setores-chave[5] em termos de emissões: "Agricultura, Silvicultura e Exploração Vegetal", "Pecuária e Pesca", "Indústria Extrativa Mineral", "Fabricação de Alimentos", "Fabricação de Celulose, Papel e Produtos de Papel", "Fabricação de Derivados do Petróleo e Álcool", "Fabricação de Produtos Químicos", "Fabricação de Produtos de Minerais Não-Metálicos", "Metalurgia", "Fabricação de Veículos Automotores", "Construção" e "Transporte, Armazenagem e Correio". Os setores "Fabricação de Derivados do Petróleo e Álcool", "Fabricação de Produtos de Minerais Não-Metálicos" e "Indústria Extrativa Mineral" foram aqueles que levaram às maiores emissões nas exportações por unidade monetária. Os autores evidenciam a alta intensidade de emissões embutidas nas exportações do Estado[6], associando esse resultado à hipótese do "refúgio da poluição" (*pollution haven hypothesis*), na qual países com legislações ambientais menos restritivas seriam mais competitivos na produção de bens intensivos em poluição, com crescentes exportações desses bens a partir desses países para outros com arcabouços regulatórios ambientais mais rígidos (*MONGELLI et al*., 2004).

O presente trabalho usou um modelo de insumo-produto híbrido, com a incorporação de um setor energético, com base em dados de consumo de energia e nas matrizes de insumo-produto para o Estado de Minas Gerais nos anos de 2005, 2008 e 2013, para os quais havia uma matriz de insumo-produto estadual disponível. Assim, pretendeu-se observar a evolução da estrutura produtiva do Estado no período 2005-

[5] O conceito de setor-chave foi desenvolvido por *Rasmussen* (1956) com base nos efeitos multiplicadores da demanda final. Segundo Souza *et al*. (2017), "[s]etores que possuem os maiores efeitos propulsores sobre a cadeia produtiva são conhecidos como setores-chave e, dado esse caráter significativamente multiplicador, constituem informação valiosa para o desenvolvimento de políticas econômicas".

[6] Carvalho e *Perobelli* (2009) chegam à mesma conclusão para as exportações brasileiras.

2013: quais os setores mais intensos em emissões – incluindo aqueles considerados "setores-chave" – e qual a intensidade das emissões embutidas nas exportações totais do Estado, inferindo algumas conclusões a partir de como esses resultados variaram ao longo do tempo.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada no trabalho parte da conceituação de *Miller* e *Blair* (2009, p. 447) de modelos generalizados de insumo-produto, nos quais são adicionadas linhas e/ou colunas à matriz de coeficientes técnicos a fim de se refletir um determinado fenômeno, e.g. esmissões de gases de efeito estufa. O sistema é representado matricialmente por:

$$AX + Y = X, \qquad (1)$$

no qual *A* é a matriz de coeficientes diretos, que indica a quantidade de insumo de um setor *i* necessária para produzir uma unidade de produto final do setor *j*; *X* é o vetor com os valores da produção total por setor *i*; e *Y* é a demanda final por setor *i*. A produção total necessária para atender a demanda final é então dada por:

$$X = L\,Y, \qquad (2)$$

em que $L = (I - A)^{-1}$ é a matriz de coeficientes técnicos diretos e indiretos, também chamada de matriz de *Leontief*. Os elementos dessa matriz podem ser interpretados como a produção total do setor *i* necessária para produzir uma unidade de demanda final do setor *j*.

3.1 Matrizes de Insumo-Produto em Unidades Híbridas

A construção das matrizes híbridas de insumo-produto visa incorporar os fluxos de grandezas físicas em uma economia, dados em unidades físicas, mantendo, entretanto, os fluxos monetários observados em modelos usuais de insumo-produto. Assim, de acordo com *Miller* e *Blair* (2009, p. 403) e dado o objetivo deste trabalho, é possível construir matrizes de fluxos de emissões[7], Z^e, de requerimentos diretos de emissões, A^e, e de requerimentos totais de emissões, L^e.

Os fluxos de emissões são contabilizados a partir da identidade

$$E * u + q = g, \qquad (3)$$

[7] As emissões podem ser entendidas como "embutidas" nas transações de compra e venda de combustíveis na economia. Dessa forma, pode-se falar de fluxos de energia ou de emissões, relacionadas diretamente por meio de um fator de conversão (vide tabela 1).

na qual o termo *E*u* é dado pela multiplicação do vetor-linha *E* de fluxos de emissões (a partir do setor energético para todos os outros setores) pelo vetor-coluna unitário *i*; *q* representa a demanda final por emissões e *g* a demanda total por emissões. Assim, a matriz Z^e será composta pelas linhas da matriz *Z* de fluxos monetários intersetoriais, exceto pela linha correspondente ao setor energético, que deve ser substituída pelo vetor-linha *E*, em unidades físicas (Gg, gigagramas de carbono ou mil toneladas de carbono):

$$Z^e = \begin{bmatrix} \$ & \$ & \cdots & \$ \\ Gg & Gg & \cdots & Gg \\ \$ & \$ & \cdots & \$ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \$ & \$ & \$ & \$ \end{bmatrix}$$

Analogamente, as matrizes de demanda final, F^e, e de produção, X^e tomam a seguinte forma:

$$F^e = \begin{bmatrix} \$ \\ Gg \\ \$ \\ \vdots \\ \$ \end{bmatrix} e\ X^e = \begin{bmatrix} \$ \\ Gg \\ \$ \\ \vdots \\ \$ \end{bmatrix}$$

A partir da definição $Z = A * diag(X)$, que coloca a matriz de fluxos intersetoriais como a multiplicação da matriz de coeficientes técnicos pela matriz diagonalizada da produção setorial, a matriz de requerimentos diretos de emissões, A^e, será dada por:

$$A^e = Z^e * [diag(X^e)]^{-1} \qquad (4)$$

E, finalmente, assim como no modelo original, a matriz de Leontief ou de requerimentos totais de emissões, L^e, fica[8]:

$$L^e = (I - A^e)^{-1}. \qquad (5)$$

As leis de conservação da energia aplicadas aos setores da economia implicam que a energia – e, por conseguinte, as emissões – embutida no produto de um setor *i* é igual, desconsideradas as perdas, à energia embutida em todos os insumos desse setor mais os insumos de energia "primária" que, nesse caso, se originam apenas do setor energético sob a forma de combustíveis. Em termos matriciais:

[8] A matriz *I* é a matriz identidade.

$$\alpha * diag(X^e) = \alpha * Z^e + G^e, \quad (6)$$

em que os requerimentos totais de emissões são dados pelo vetor-linha α e os insumos de energia "primária" por G^e. Substituindo a partir da relação $Z = A * diag(X)$ e rearranjando os termos, tem-se:

$$\alpha = G^e * inv\big(diag(X^e)\big) * (I - A^e)^{-1}, \quad (7)$$

De forma análoga, os requerimentos diretos e indiretos de energia são, respectivamente:

$$\delta = G^e * inv\big(diag(X^e)\big) * (I - A^e) \quad (8)$$

$$\gamma = \alpha - \delta \quad (9)$$

3.2. Impactos setoriais e setores-chave nas emissões do Estado

A análise de impacto setorial via identificação de setores-chave adotadas aqui se baseia em método similar ao apresentado em outros trabalhos no contexto de emissões, como *Alcántara* e *Padilla* (2003), Carvalho e *Perobelli* (2009) e Carvalho *et al.* (2013). Trata-se de construir uma matriz de elasticidades intersetoriais da demanda em relação ao consumo final de energia e, por conseguinte, de emissões. Tomando Γ como o uso total de energia no sistema produtivo e τ o vetor-linha correspondente ao uso de energia por unidade de produto setorial, tem-se:

$$\Gamma = \tau * X^e = \tau * L^e * F^e \quad (10)$$

Assim, uma variação no uso de energia Γ está associado a uma variação proporcional na demanda final, representada por γ:

$$\Delta\Gamma = \tau * \Delta X^e = \tau * L^e * \Delta F^e = \tau * L^e * F^e * \gamma \quad (11)$$

Seja s um vetor da participação das demandas finais setoriais nas produções dos seus respectivos setores:

$$F^e = diag(X^e) * s \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (11) e dividindo por Γ, tem-se a elasticidade do uso total de energia no sistema produtivo em relação à demanda final.

$$\Gamma^{-1} * \Delta\Gamma = \Gamma^{-1} * \tau * L^e * diag(X^e) * s * \gamma \qquad (13)$$

Ainda, para que se possa desagregar a elasticidade por setor, obtém-se o vetor-linha dos coeficientes de consumo setorial τ em termos da distribuição de energia final entre os setores, dada pelo vetor-linha *d*, com $\sum_{i=1}^{n} d_i = 1$:

$$\tau = \Gamma * d * [diag(X^e)]^{-1} \qquad (14)$$

Substituindo (14) em (13):

$$\Gamma^{-1} * \Delta\Gamma = d * [diag(X^e)]^{-1} * L^e * diag(X^e) * s * \gamma \qquad (15)$$

Diagonalizando o vetor *s* e o vetor-linha *d* e omitindo-se *γ* (considera-se o caso padrão de uma variação de 1% na demanda final), resta a relação que fornece a matriz de elasticidades Γ^{ε}, ou a variação proporcional do consumo setorial de energia em relação a uma mudança na demanda final:

$$\Gamma^{\varepsilon} = diag(d) * [diag(X^e)]^{-1} * L^e * diag(X^e) * diag(s) \qquad (16)$$

Os elementos da matriz Γ^{ε}, τ_{ij}^{ε}, expressam a variação percentual no consumo de energia final do setor *i* em resposta a uma variação de 1% na demanda final do setor *j*. A soma dos elementos da coluna do setor *j* representa a variação percentual do consumo de energia total da economia em resposta a uma mudança de 1% na demanda final do setor *j*. A soma dos elementos da linha do setor *i*, por sua vez, representa a variação percentual do consumo de energia final do setor *i* em resposta a uma mudança de 1% na demanda final de toda a economia. *Alcántara e Padilla* (2003) conceituam a soma das colunas como o "impacto total" e a soma das linhas como o "impacto distributivo" de um determinado setor. Entende-se que um elevado impacto total está relacionado ao alto conteúdo de energia embutido nas compras do setor; um elevado impacto distributivo se relaciona a um consumo de energia setorial fortemente determinado pela demanda dos outros setores.

Por fim, um setor será caracterizado como chave se seus impactos total e distributivo forem superiores aos valores medianos de impacto total (Γ_T^{ε}) e distributivo (Γ_D^{ε}). Caso um setor apresente $\sum_i \tau_{ij}^{\varepsilon} < \Gamma_T^{\varepsilon}$ e $\sum_j \tau_{ij}^{\varepsilon} > \Gamma_D^{\varepsilon}$, sua relevância em termos de emissões se dá em conexão com a demanda de outros setores. Caso ocorra o inverso, $\sum_i \tau_{ij}^{\varepsilon} > \Gamma_T^{\varepsilon}$ e $\sum_j \tau_{ij}^{\varepsilon} < \Gamma_D^{\varepsilon}$, sua relevância reside na sua própria demanda, que exige um alto conteúdo de energia. Se $\sum_i \tau_{ij}^{\varepsilon} < \Gamma_T^{\varepsilon}$ e $\sum_j \tau_{ij}^{\varepsilon} < \Gamma_D^{\varepsilon}$, trata-se de um setor com menor relevância para a análise de emissões.

3.3. Emissões incorporadas nas Exportações

As emissões incorporadas nas exportações podem ser obtidas a partir da igualdade entre o vetor de energia ou de emissões advindas do setor energético e o produto entre os coeficientes de requerimento total e a demanda final, que assegura a consistência do modelo para uma economia fechada (MACHADO, 2002):

$$G^e = \alpha * F^e \qquad (17)$$

Dado que as exportações, ϑ, constituem parte da demanda final, adapta-se (17) para que se consiga a energia embutida nas exportações de cada setor, K^e, basta calcular:

$$K^e = \alpha * \theta \qquad (18)$$

4 PREPARAÇÃO DAS BASES DE DADOS

O trabalho utilizou as matrizes de insumo-produto para Minas Gerais nos anos de 2005, 2008 e 2013, estimadas por FJP (2008, 2015, 2018). Foram também usados os dados energéticos disponíveis (em toneladas de petróleo equivalente) para esses mesmos anos no BEE-MG (CEMIG, 2016).

A preparação dessas bases de dados incluiu a compatibilização dos setores que compõem cada uma das três matrizes de insumo-produto com os dados energéticos disponíveis. A composição setorial escolhida seguiu aquela apresentada na matriz de 2005, devido ao seu menor nível de desagregação. A partir de FJP (2008) foi então construída uma matriz híbrida de insumo-produto com 35 setores, sendo que os mesmos foram mantidos para as matrizes híbridas derivadas paras os anos de 2008 e 2013 (cujas matrizes originais contêm um número maior de setores, exigindo a aplicação de técnicas de compatibilização com base no valor de produção). De posse das matrizes dos fluxos monetários intersetoriais, o processo de hibridização consistiu na substituição dos valores monetários presentes na linha referente ao setor energético ("Fabricação de Derivados do Petróleo e Álcool") por valores em unidades físicas (*Gg*). O mesmo processo foi feito para os vetores de produção e demanda final. Além disso, para compensar a perda dos valores monetários e balancear a matriz em termos de oferta e demanda, a matriz de fluxos intersetoriais foi ajustada via multiplicação pela razão entre a soma total dos consumos intermediários e a soma total dos consumos intermediários com exceção da linha do setor energético. O mesmo procedimento foi adotado para os vetores de produção e demanda final.

A desagregação dos dados do BEE-MG nos 35 setores da matriz, inicialmente divulgados para 12 setores, foi feita para cada um dos anos analisados a partir da premissa de que as emissões variam linearmente com a produção. Além disso, as correspondências entre os 35 setores da matriz de 2005 e os 12 setores do BEE-MG (que se conservaram os mesmos ao longo do período) foram mantidas de acordo com aquelas adotadas por Carvalho *et al*. (2013, p. 394).

As unidades físicas utilizadas foram obtidas por meio da conversão dos valores de energia disponíveis no BEE-MG em *Gg* de emissões de carbono. Tal conversão se baseou nos coeficientes fornecidos por Economia e Energia (2000), dados em *Gg* por tonelada de petróleo equivalente e expostos na tabela 1. Ressalta-se, ainda, que foram consideradas exclusivamente as emissões provenientes da queima dos seguintes combustíveis fósseis ou de biomassa, disponíveis no BEE-MG: óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, gasolina, GLP, querosene, gás de coqueria, coque de carvão mineral, álcool etílico e outras fontes secundárias.

Tabela 1: Coeficientes de conversão de energia em emissões (1) (Gg/tpe)

Setores	Óleo Diesel	Biodiesel	Óleo Comb.	Gasolina	GLP	Querosene	Gás de Coqueria	Coque de Carvão Mineral	Álcool Etílico	Outras Fontes Secund.
Agropecuário	3,07	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,07	3,78	2,39	3,07
Mineração	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Minerais Não-Metálicos	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Metalurgia	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Papel e Celulose	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Química	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Alimentos e Bebidas	3,07	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,07	3,81	3,03	3,07
Têxtil	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Outras indústrias	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Comércio e Serviços	3,07	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,07	3,81	2,71	3,07
Transporte	3,00	3,07	3,21	2,35	2,62	2,97	3,07	3,95	2,76	3,07
Serviços Públicos	3,07	3,07	3,21	2,87	2,62	2,98	3,07	3,93	2,80	3,07
Setor Energético	3,07	3,07	3,21	2,87	2,61	2,98	3,07	3,94	3,00	3,07

Fonte: Elaboração própria.
(1) Adaptado de Economia e Energia (2000).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram divididos em três partes: requerimentos totais de emissões, setores-chave nas emissões do Estado e as emissões incorporadas nas suas exportações. É dado foco à evolução observada ao longo do período 2005-2013, na tentativa de elucidar tendências e variações no desempenho da estrutura produtiva do Estado em termos de emissões de carbono.

Vale ressaltar que os resultados obtidos para o ano de 2005 não coincidiram de forma significativa com aqueles apresentados por Carvalho *et al.* (2013). Por exemplo, apenas 16 dos 35 setores analisados apresentaram classificação similar à atribuída em Carvalho *et al.* (2013). Tais divergências podem ser atribuídas a diferenças metodológicas, principalmente na seleção e preparação das bases de dados.

Outro ponto de atenção em relação aos resultados de 2005 se refere à metodologia de construção da tabela de recursos de usos do Estado de Minas Gerais, utilizada no cálculo da matriz de insumo-produto daquele ano (FJP, 2008). Nesse caso, não foi considerada a produção secundária de cada setor, em contraste com a metodologia adotada para 2008 (FJP, 2015) e 2013 (FJP, 2018). Mantendo essas considerações em vista, passa-se então aos resultados obtidos.

5.1 Requerimentos totais de emissões

Os resultados dos requerimentos totais de emissões para os três anos analisados estão apresentados na tabela 2. De forma geral, observou-se uma redução dos requerimentos totais para quase todos os setores da economia do Estado no período. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o crescimento da economia do período não foi acompanhado por um aumento proporcional das emissões, indicando uma menor dependência relativa da estrutura produtiva mineira em relação ao consumo dos combustíveis analisados. Em 2005, o setor de "transporte, armazenagem e correio" apresentou os maiores requerimentos totais de emissões, lançando 1,8660 mil toneladas de carbono na atmosfera para cada R$1.000.000,00 de demanda final, seguido de perto pelo setor "fabricação de derivados do petróleo e álcool". Os setores "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos", "metalurgia" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" também se destacaram, com cerca de 0,8 mil toneladas de carbono emitidas para cada R$1.000.000,00 de demanda final. Os outros setores não apresentaram requerimentos totais de emissões relevantes em comparação.

Ao final do período, em 2013, o setor com os maiores requerimentos totais de emissões foi a "fabricação de derivados do petróleo e álcool", com 1,630 mil toneladas (queda de 6,3% em relação a 2005). O setor de

"transporte, armazenagem e correio" caiu para o segundo lugar, com 1,082 mil toneladas de carbono por R$1.000.000,00 de demanda final, uma redução significativa de 42% em relação ao ano de 2005. Os setores de "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos", "metalurgia" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" viram suas emissões por R$1.000.000,00 de demanda final caírem para cerca de 0,5 mil toneladas de carbono, ou uma redução de 47%, 44% e 35%, respectivamente.

5.2 Setores-chave nas emissões

A classificação dos 35 setores está apresentada na tabela 3. Com base nas definições dadas na seção 3.2, os setores foram divididos entre aqueles com impactos total e distributivo superiores aos valores medianos (CHAVE), aqueles em que apenas o impacto total é superior ao valor mediano de impacto total (TOTAL), aqueles em que somente o impacto distributivo é superior ao seu respectivo valor mediano (DISTR) e, finalmente, aqueles em que os impactos total e distributivo são menores do que seus valores medianos (-).

Os resultados mostram pouca variação no período, com os setores-chave se concentrando nas atividades agropecuárias, de extração mineral, da indústria de transformação e de transportes. Em 2005, foi contabilizado um total de 11 setores-chave, ao passo que, em 2008 e 2013, esse total subiu para 14 setores. Considerando um universo de 35 setores, a identificação de até 40% desses como chave sugere que boa parte das emissões estariam concentradas em setores com fortes encadeamentos produtivos, o que poderia associar a proposição de políticas públicas de mitigação de emissões a impactos econômicos significativos. Por outro lado, alguns setores viram seus impactos total e/ou distributivo serem relativamente reduzidos, como foi o caso para os setores "fabricação de produtos do fumo", "fabricação de celulose, papel e produtos de papel", "fabricação de máquinas e equipamentos", "fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos" e "fabricação de peças e acessórios para veículos automotores".

Tabela 2: Requerimentos totais de emissões – 2005-2008-2013

SETOR	2005	2008	2013	SETOR	2005	2008	2013
Agricultura, silvicultura e exploração florestal	0,1634	0,1139	0,0960	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	0,2154	0,0902	0,0514
Pecuária e pesca	0,1718	0,1215	0,1051	Fabricação de veículos automotores	0,2247	0,0928	0,0717
Indústria extrativa mineral	0,2550	0,1485	0,0594	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	0,2809	0,0956	0,0759
Fabricação de alimentos	0,1702	0,1214	0,0904	Fabricação de outros equipamentos de transporte	0,2254	0,0929	0,0598
Fabricação de bebidas	0,1651	0,1214	0,0769	Fabricação de móveis, produtos de madeira e artigos diversos	0,1319	0,0779	0,0390
Fabricação de produtos do fumo	0,1358	0,0250	0,0410	Eletricidade, gás, água e limpeza urbana	0,0262	0,0201	0,0238
Fabricação de produtos têxteis	0,1519	0,1073	0,0876	Construção	0,1857	0,1102	0,0630
Fabricação de artefatos de couro e calçados	0,1753	0,1105	0,0865	Comércio	0,0686	0,0397	0,0345
Fabricação de artigos do vestuário e acessórios	0,1389	0,1105	0,0712	Transporte, armazenagem e correio	1,8660	1,4188	1,0821
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	0,1680	0,0851	0,0683	Serviços de informação	0,0494	0,0457	0,0165
Fabricação de derivados do petróleo e álcool	1,7399	1,7132	1,6302	Intermediação financeira e seguros	0,0294	0,0242	0,0258
Fabricação de produtos farmacêuticos, perfumaria, higiene e limpeza	0,1932	0,1294	0,0722	Atividades imobiliárias e aluguel	0,0123	0,0073	0,0047
Fabricação de produtos de borracha e plástico	0,1970	0,0742	0,0555	Serviços de alojamento e alimentação	0,0492	0,0409	0,0258
Fabricação de produtos químicos	0,1702	0,1234	0,0830	Serviços prestados às empresas	0,0368	0,0241	0,0159
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	0,8090	0,7119	0,5247	Educação e saúde mercantil	0,0595	0,0374	0,0186
Metalurgia	0,8227	0,5141	0,4599	Administração pública	0,0245	0,0173	0,0118
Fabricação de produtos de metal exceto máquinas e equipamentos	0,8398	0,5028	0,4410	Outros serviços	0,0532	0,0247	0,0147
Fabricação de máquinas e equipamentos	0,2992	0,0761	0,0471				

Fonte: Elaboração própria.

Cinco setores-chave apresentaram impactos totais ou distributivos bem acima da média durante todo o período. A simples plotagem dos impactos permite visualizar como esses setores se destacaram (gráfico 1 para 2005, gráfico 2 para 2008 e gráfico 3 para 2013). O setor "fabricação de derivados do petróleo e álcool" (setor energético) exibiu o maior impacto distributivo, o que decorre do fato de que a demanda dos outros setores por combustíveis é suprida diretamente por ele. Entretanto, o impacto distributivo desse

setor apresentou forte contração no período, caindo de 3,1 em 2005 para 1,67 em 2008 e 1,19 em 2013. Esse resultado poderia ser explicado, por exemplo, por uma maior proporção da venda de combustíveis sendo feita para um grupo menor de setores demandantes.

O setor "transporte, correio e armazenagem" contou com o maior impacto total, devido à sua grande demanda por combustíveis. O impacto se viu reduzido ao longo do período: de 0,80 em 2005 para 0,59 em 2008 e 0,47 em 2013. Tais resultados poderiam ser explicados de várias formas, incluindo as hipóteses de ganhos de eficiência produtiva no setor (renovação da frota, uso de outros modais de transporte, biocombustíveis ou veículos híbridos) ou a de maior demanda de outros setores por combustíveis (visto que os impactos devem ser vistos de forma relativa entre setores). O impacto distributivo do setor de transportes também se destacou e, nesse caso, com acréscimos no período: 0,30 em 2005, 0,32 em 2008 e 0,46 em 2013. Em conjunto, poder-se-ia dizer que esse setor consolidou seu papel de setor-chave ao desenvolver elos produtivos mais significativos com seus demandantes no contexto das emissões de carbono.

Os setores "metalurgia", "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" exibiram altos impactos totais, dado o alto conteúdo de energia nos seus processos produtivos. De forma geral, seus impactos totais caíram respectivamente de 0,37, 0,28 e 0,20 em 2005 para 0,33, 0,16 e 0,17 em 2008 e 0,27, 0,19 e 0,14 em 2013. Essa tendência significa que esses setores vêm reduzindo seu conteúdo de energia vis-à-vis o conteúdo de energia dos demais setores. No caso do setor "metalurgia", os impactos distributivos também se mostraram relevantes, contudo com queda no período: de 0,33 em 2005 para 0,21 em 2008 e 0,15 em 2013, indicando que suas emissões se originam cada vez menos em decorrência da demanda dos outros setores do Estado.

Tabela 3: Setores-chave nas emissões – 2005-2008-2013

SETOR	2005	2008	2013	SETOR	2005	2008	2013
Agricultura, silvicultura e exploração florestal	DISTR	CHAVE	CHAVE	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	TOTAL	CHAVE	-
Pecuária e pesca	DISTR	DISTR	CHAVE	Fabricação de veículos automotores	CHAVE	CHAVE	CHAVE
Indústria extrativa mineral	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	TOTAL	-	-
Fabricação de alimentos	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Fabricação de outros equipamentos de transporte	TOTAL	-	TOTAL
Fabricação de bebidas	-	TOTAL	TOTAL	Fabricação de móveis, produtos de madeira e artigos diversos	-	-	-
Fabricação de produtos do fumo	TOTAL	-	-	Eletricidade, gás, água e limpeza urbana	-	-	-
Fabricação de produtos têxteis	DISTR	CHAVE	CHAVE	Construção	TOTAL	TOTAL	TOTAL
Fabricação de artefatos de couro e calçados	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Comércio	DISTR	DISTR	DISTR
Fabricação de artigos do vestuário e acessórios	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Transporte, armazenagem e correio	CHAVE	CHAVE	CHAVE
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	DISTR	DISTR	-	Serviços de informação	-	-	-
Fabricação de derivados do petróleo e álcool	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Intermediação financeira e seguros	-	-	-
Fabricação de produtos farmacêuticos, perfumaria, higiene e limpeza	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Atividades imobiliárias e aluguel	-	-	-
Fabricação de produtos de borracha e plástico	-	-	-	Serviços de alojamento e alimentação	-	-	-
Fabricação de produtos químicos	DISTR	DISTR	DISTR	Serviços prestados às empresas	-	-	-
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Educação e saúde mercantil	-	-	-
Metalurgia	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Administração pública	-	-	-
Fabricação de produtos de metal exceto máquinas e equipamentos	CHAVE	CHAVE	CHAVE	Outros serviços	-	-	-
Fabricação de máquinas e equipamentos	TOTAL	TOTAL	-				

Fonte: Elaboração própria.

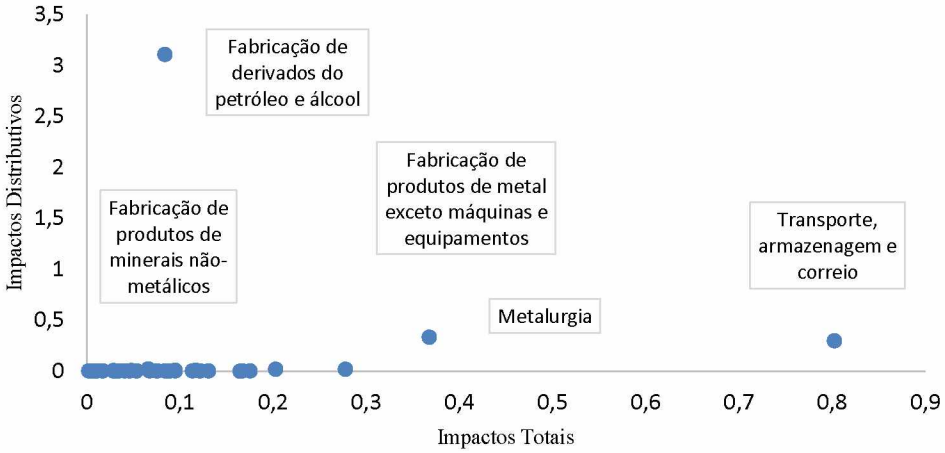
5.3 Emissões incorporadas nas exportações

As emissões incorporadas nas exportações internacionais do Estado são mostradas na tabela 4. Os setores com os maiores montantes de emissões embutidas nas exportações foram, em ordem decrescente, "metalurgia", "transporte, armazenagem e correio", "indústria extrativa mineral", "agricultura, silvicultura e exploração florestal" e "fabricação de derivados do petróleo e álcool". Setor de destaque na pauta

exportadora de Minas Gerais, a metalurgia contabilizou cerca de 7,3 milhões de toneladas de carbono incorporadas às suas exportações em 2005. Esse total diminuiu para 6,2 milhões em 2008 e 5,1 milhões em 2013. Tais resultados também ilustram a redução relativa do conteúdo de energia nos insumos desse setor.

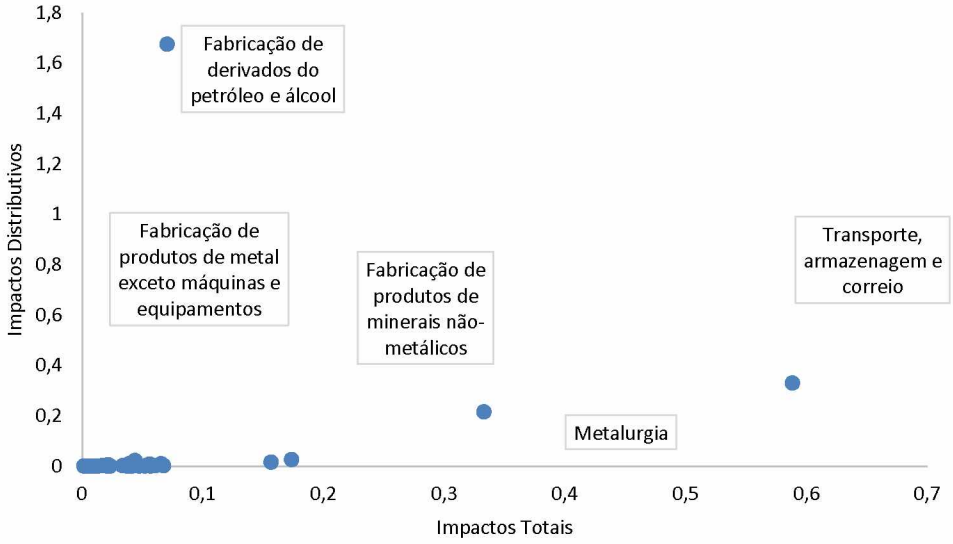
As exportações do setor de transportes foram acompanhadas por totais de emissões iguais a 2,0, 1,2 e 1,6 milhões de toneladas em 2005, 2008 e 2013, respectivamente. Tais resultados se relacionam, por um lado, à redução dos impactos totais do setor e, por outro, ao aumento dos impactos distributivos ao longo do período.

Gráfico 1: Impactos distributivos e totais dos setores em 2005



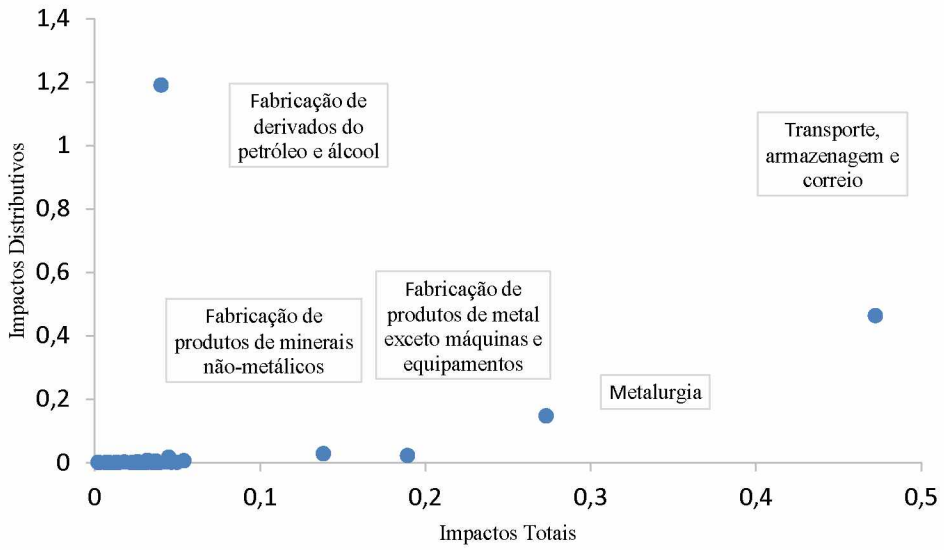
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 2: Impactos distributivos e totais dos setores em 2008



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 3: Impactos distributivos e totais dos setores em 2013



Fonte: Elaboração própria.

A indústria extrativa mineral apresentou aumento nas emissões embutidas nas suas exportações: de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas em 2005 para 1,7 milhões em 2008 e 2,0 milhões em 2013. Tais resultados contrastam com a forte redução dos requerimentos totais de emissões do setor entre 2005 e 2013 (vide tabela 2). Entretanto, eles se justificam por meio da elevação acentuada do volume de exportações dessa indústria (em unidades monetárias) no período, que cresceu mais de seis vezes entre 2005 e 2013. O mesmo ocorre para o setor "agricultura, silvicultura e exploração florestal", cujo aumento das emissões embutidas nas exportações – de 752 mil toneladas em 2005 para 781 mil toneladas em 2013 – diverge da redução dos requerimentos totais de emissões, mas se explica pela elevação de cerca de 100% dos montantes monetários exportados.

Por fim, o setor "fabricação de derivados do petróleo e álcool" apresentou aumento de quase 15 vezes nas emissões incorporadas às exportações, o que não pode ser explicado pela aproximada constância dos seus requerimentos totais de emissões no período. A causa identificada foi, também nesse caso, um crescimento correspondente no volume monetário das exportações do setor.

6 CONCLUSÃO

Os resultados do trabalho apontaram que os setores "fabricação de derivados do petróleo e álcool", "transporte, correio e armazenagem", "metalurgia", "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" se mantiveram como os setores de maior relevância em termos de emissões de carbono entre 2005 e 2013. Por outro lado, foi possível identificar uma perda relativa da relevância desses mesmos setores, com a redução dos seus valores de requerimentos totais de emissões e impactos totais e distributivos ao longo do período. Em relação às emissões incorporadas nas exportações, os setores "indústria extrativa mineral" e "agricultura, silvicultura e exploração florestal" substituíram os setores "fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos" e "fabricação de produtos de minerais não-metálicos" no rol dos cinco setores mais relevantes, dados seus elevados volumes de vendas externas.

Assim, foi possível avaliar a evolução da estrutura produtiva do Estado de Minas Gerais no contexto da intensidade de emissões de carbono a partir da queima de combustíveis entre os anos de 2005 e 2013. Foram mensurados os requerimentos totais de emissões dos 35 setores da economia mineira devidos a variações na demanda final, identificados os setores-chave em termos das emissões e analisada a estrutura exportadora do Estado quanto à intensidade das emissões embutidas no seu comércio internacional. Os resultados obtidos se prestam ao embasamento de políticas públicas ambientais mais efetivas no âmbito dos impactos da atividade econômica mineira sobre o aquecimento global. Esclarecimentos acerca dos encadeamentos produtivos e como os mesmos influenciam as emissões de carbono ao longo do tempo constituem ferramenta essencial para a compreensão e solução do problema colocado pelo aquecimento global.

Tabela 4: Emissões incorporadas nas exportações – 2005-2008-2013

SETOR	2005	2008	2013	SETOR	2005	2008	2013
Agricultura, silvicultura e exploração florestal	752,06	590,06	781,39	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	65,20	47,29	26,31
Pecuária e pesca	2,21	30,16	27,29	Fabricação de veículos automotores	220,37	221,73	142,76
Indústria extrativa mineral	1472,73	1724,96	1977,68	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	88,13	67,55	82,21
Fabricação de alimentos	230,67	254,86	387,92	Fabricação de outros equipamentos de transporte	0,27	4,38	6,75
Fabricação de bebidas	0,14	20,04	0,65	Fabricação de móveis, produtos de madeira e artigos diversos	7,95	10,01	12,65
Fabricação de produtos do fumo	0,05	0,00	0,14	Eletricidade, gás, água e limpeza urbana	0,00	0,00	0,01
Fabricação de produtos têxteis	28,41	24,91	8,51	Construção	0,00	0,00	0,03
Fabricação de artefatos de couro e calçados	9,90	6,10	20,96	Comércio	130,25	81,63	133,40
Fabricação de artigos do vestuário e acessórios	1,26	10,37	1,04	Transporte, armazenagem e correio	2011,19	1170,56	1574,81
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	94,30	89,96	86,26	Serviços de informação	0,00	-0,11	-0,04
Fabricação de derivados do petróleo e álcool	52,16	354,91	741,77	Intermediação financeira e seguros	0,00	0,00	0,00
Fabricação de produtos farmacêuticos, perfumaria, higiene e limpeza	1,28	9,20	44,39	Atividades imobiliárias e aluguel	0,00	0,00	0,00
Fabricação de produtos de borracha e plástico	7,17	8,57	7,32	Serviços de alojamento e alimentação	0,00	0,16	0,14
Fabricação de produtos químicos	118,71	123,66	75,13	Serviços prestados às empresas	0,00	0,10	0,07
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	165,46	256,11	194,80	Educação e saúde mercantil	0,00	0,27	0,01
Metalurgia	7307,17	6192,29	5085,15	Administração pública	0,00	0,23	0,78
Fabricação de produtos de metal exceto máquinas e equipamentos	148,10	82,08	89,75	Outros serviços	0,00	1,22	0,10
Fabricação de máquinas e equipamentos	92,62	31,35	22,07				

Fonte: Elaboração própria.

7 REFERÊNCIAS

ALCÁNTARA, V.; PADILLA, E. "Key" sectors in final energy consumption: an input–output application to the Spanish case. *Energy Policy*, v. 31, p. 1673-1678, 2003.

CARVALHO, T.S.; PEROBELLI, F.S. Avaliação da intensidade de emissões de CO2 setoriais e na estrutura de exportações: um modelo inter-regional de insumo-produto São Paulo/restante do Brasil. *Economia Aplicada*, v. 13, n. 1, p. 99–124, 2009.

CARVALHO, T. S.; SANTIAGO, F. S.; PEROBELLI, F. S. International Trade and Emissions: the case of the Minas Gerais state – 2005. *Energy Economics*, v. 40, p. 383-395, 2013.

COMISSÃO MISTA PERMANENTE SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. *Legislação brasileira sobre mudanças climáticas*. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.senado.leg.br/comissoes/CMMC/Livro_legislacao_ambiental_Completo_Final_17_09_2013.pdf>. Acesso em 03 de abril de 2018.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. *31º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://sgpd.cemig.com.br/ojs/index.php/BEEMG/issue/viewIssue/59/68>. Acesso em 06 de março de 2018.

ECONOMIA E ENERGIA. *Coeficientes da matriz de emissões*, 2000. Disponível em: <http://ecen.com/matriz/eee24/coef_mat.htm>. Acesso em 06 de março de 2018.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. *Estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa do Estado de Minas Gerais - ano base 2010*. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2013/estimativas_gee_2010_231213.pdf >. Acesso em: 15 de março de 2018.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. *Plano de energia e mudanças climáticas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2015. Sumário executivo. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/2015/ENERGIA_M_CILMATICAS/010615pemc_sumario_executivo_capa_nova_ficha_catalografica.pdf>. Acesso em 15 de março de 2018.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. *Tabela de recursos e usos (TRU-Regional) e matriz de insumo-produto para o Estado de Minas Gerais para o ano de 2005*. Belo Horizonte, 2008. Anexo Estatístico. Disponível em:

<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos1/2737-tabela-de-recursos-e-usos-tru-mg-e-matriz-insumo-produto>. Acesso em 03 de março de 2018.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. *Produto interno bruto de Minas Gerais / 2010*. Belo Horizonte, 2012. Relatório anual. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos1/2745-produto-interno-bruto-de-minas-gerais-pib-2>. Acesso em 15 de março de 2018.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. *Tabela de recursos e usos e matriz de insumo-produto de Minas Gerais 2008*. Belo Horizonte, 2015. Anexo Estatístico. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos1/2737-tabela-de-recursos-e-usos-tru-mg-e-matriz-insumo-produto>. Acesso em 03 de março de 2018.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO – FJP. *Tabela de recursos e usos e matriz de insumo-produto de Minas Gerais 2013*. Belo Horizonte, 2018. Anexo Estatístico. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos1/2737-tabela-de-recursos-e-usos-tru-mg-e-matriz-insumo-produto>. Acesso em 06 de novembro de 2018.

GAY, P.W.; PROOPS, J.L.R. Carbon-dioxide production by the UK economy: an input-output assessment. *Applied Energy*, v. 44, p. 113-130, 1993.

GOWDY, J.M.; MILLER, J.L. Technological and demand change in energy use: an input–output analysis. *Environmental Planning*, v. 19, p. 1387–1398, 1987.

HANNON, B. The role of input–output analysis of energy and ecologic systems in the early development of ecological economics – a personal perspective. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1185, p. 30-38, 2010.

HAWDON, D.; PEARSON, P. Input–output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK. *Energy Economics*, v. 17, p. 73–86, 1995.

HETHERINGTON, R. An input–output analysis of carbon dioxide emissions for the UK. *Energy Conversion Management*, v. 37, p. 979–984, 1996.

HILGEMBERG, E.M. *Quantificação e efeitos econômicos do controle de emissões de CO_2 decorrentes do uso de gás natural, álcool e derivados do petróleo no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto*. 2004. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HILGEMBERG, E.M.; GUILHOTO, J.J.M. Uso de combustíveis e emissões de CO_2 no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. *Nova Economia*, v. 16, n. 1, p. 49-99, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Quais as consequências do aquecimento global?*, 2011. Disponível em <http://www.inpe.br/acessoainformacao/node/483>. Acesso em 05 de abril de 2018.

LABANDEIRA, X.; LABEAGA, J.M. Estimation and control of Spanish energy-related CO2 emissions: an input–output approach. *Energy Policy*, v. 30, p. 597–611, 2002.

LENZEN, M. Primary energy and greenhouse gases embodied in Australian final consumption: an input-output analysis. *Energy Policy*, v. 26, n. 6, p. 495-506, 1998.

LEONTIEF, W. *Input-Output Economics* (2a Ed.). Oxford: Oxford University Press, 1986.

MACHADO, G.V. *Meio ambiente e comércio exterior: impactos da especialização comercial brasileira sobre o uso de energia e as emissões de carbono no país*. 2002. 184 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MILLER, R.; BLAIR, P. *Input–Output Analysis: Foundations and Extensions* (2a Ed). New Jersey: Prentice-Hall, 2009.

MINAS GERAIS. *Plano Plurianual de Ação Governamental 2012-2015*. Belo Horizonte, 2011. Disponível em <http://www.iof.mg.gov.br/?option=com_docman&task=doc_download&gid=276&Itemid=48>. Acesso em 20 de fevereiro de 2018.

MINAS GERAIS. Decreto n° 46.817, de 12 de agosto de 2015. Cria o Comitê Político do Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais. *Diário Oficial do Estado de Minas Gerais*, Governo do Estado, Belo Horizonte, MG.

MONGELLI, I.; TASSIELLI, G.; NOTARNICOLA, B. Global warming agreements, international trade and energy/carbon embodiments: an input-output approach to the Italian case. *Energy Policy*, v. 34, p. 88-100, 2004.

PEROBELLI, F.S.; FARIA, W.S.; VALE, V. de A. The increase in Brazilian household income and its impact on CO_2 emissions: evidence for 2003 and 2009 from input-output tables. *Energy Economics*, v. 52, p. 228-239, 2015.

PEROBELLI, F.S.; MATTOS, R.S.; FARIA, W.R. Interações energéticas entre o Estado de Minas Gerais e o restante do Brasil: uma análise inter-regional de insumo-produto. *Economia Aplicada*, v. 11, n. 1, p. 113–130, 2007.

PROOPS, J.L.R.; FABER, M.; WAGENHALS, G. *Reducing CO_2 emissions: a comparative input-output study for Germany and the UK*. Berlin: Springer, 1993.

RASMUSSEN, P. *Studies in intersectoral relations*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1956.

ROCKSTRÖM, J. *et al*. A safe operating space for humanity. *Nature*, v. 461, n. 24, p. 472-575, 2009.

SOUZA, C.C.A. de; GONÇALVES, C.C.S.; FRANCO, M.P.V. Setores-chave da economia de Minas Gerais em 2008. *Economia Ensaios*, v. 31, n. 2, p. 103-136, 2017.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.J.; MCNEILL, J.R. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio*, v. 36, n. 8, p. 614-621, 2007.

TARANCÓN MORÁN, M.A.; DEL RÍO GONZÁLEZ, P. A combined input-output and sensitivity analysis approach to analyze sector linkages and CO2 emissions. *Energy Economics*, v. 29, n. 3, p. 578–597, 2007.

VALE, V. de A.; PEROBELLI F.S.; CHIMELI, A.B. International trade, pollution, and economic structure: evidence on CO_2 emissions for the North and the South. *Economic Systems Research*, v. 30, p. 1-17, 2018.