

IMPACTOS ECONÔMICOS DA PROPOSTA BRASILEIRA NA COP21: UMA ABORDAGEM DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL¹

Marco Paulo Vianna Franco²
Micaele Martins de Carvalho³
Stélio Coêlho Lombardi Filho⁴
Aline Souza Magalhães⁵
Edson Paulo Domingues⁶

Este artigo tem como objetivo simular os prováveis impactos econômicos decorrentes da proposta brasileira na XXI Conferência das Partes (COP21) de reduzir em 37% suas emissões de gases de efeito estufa (GEEs), em relação aos níveis de 2005, até 2025. Para tal, utiliza-se um modelo de equilíbrio geral computável (EGC) dinâmico-recursivo com módulos de especificação energética e ambiental que permitem agrupamentos por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias) e atividade emissora. De forma geral, os resultados indicam um decréscimo acumulado de -3,3% do produto interno bruto (PIB) real, em 2025, em relação ao cenário-base. Conforme esperado, os setores com mais dependência em relação à queima de combustíveis, ou com elevada intensidade de emissões nos seus processos produtivos, seriam os mais negativamente afetados.

Palavras-chave: COP21; emissões de gases de efeito estufa; equilíbrio geral computável.

ECONOMIC IMPACTS OF THE BRAZILIAN PROPOSAL IN COP21: A COMPUTABLE GENERAL EQUILIBRIUM APPROACH

This article aims to simulate the likely economic impacts associated with the Brazilian proposal, pledged during COP21, to cut its greenhouse gases emissions by 37% until 2025, compared to 2005 levels. A computable general equilibrium model with a recursive-dynamic structure was developed, which includes energetic and environmental specification modules that allow for emissions grouping by emitting agent (fuel, industries and households) and emitting activity. The results indicate a cumulative decrease of -3.3% in real GDP in 2025, compared to the baseline scenario. As expected, sectors with the greatest dependence on fuel burning, or with intensive emissions in their production processes, were the most negatively affected.

Keywords: COP21; greenhouse gases emissions; computable general equilibrium.

JEL: C68; Q52; Q58.

1. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ppe52n1art6>

2. Pesquisador em ciências aplicadas e políticas públicas da Fundação João Pinheiro (FJP). *E-mail:* <marco.franco@fjp.mg.gov.br>.

3. Consultora do Tesouro do Estado do Espírito Santo. *E-mail:* <micaele.mcarvalho@gmail.com>.

4. Professor adjunto na Faculdade de Economia da Universidade Federal da Bahia (UFBA); e do Programa de Pós-Graduação em Economia (PPGE) da UFBA. *E-mail:* <stelio.filho@hotmail.com>.

5. Professora adjunta no Departamento de Ciências Econômicas e pesquisadora do Cedeplar/UFMG. *E-mail:* <alinesm@cedeplar.ufmg.br>.

6. Professor titular no Departamento de Ciências Econômicas e pesquisador do Cedeplar/UFMG. *E-mail:* <epdomin@cedeplar.ufmg.br>.

1 INTRODUÇÃO

No fim de 2015, em Paris, o XXI Encontro Anual da Conferência das Partes (COP21), organizado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), reuniu 195 países e contou com a presença dos principais estudiosos e especialistas sobre mudanças climáticas. Como resultado, alcançou um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, substituindo o Protocolo de Kyoto (1997) e visando manter o aquecimento global abaixo dos 2 °C até 2100.

Os países apresentaram suas pretendidas contribuições nacionalmente determinadas (intended nationally determined contribution – INDC) para o novo acordo adotado na COP21. As INDCs são voluntárias e submetidas pelos países, assumindo um compromisso com o desafio de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) (UNFCCC, 2015).

Os Estados Unidos, por exemplo, anunciaram como meta reduzir de 26% a 28% das emissões de GEE até 2025, em relação ao ano-base de 2005. Da mesma forma, os 28 membros da União Europeia (UE) comprometeram-se com uma meta vinculativa de redução de pelo menos 40% das emissões de GEE até 2030, em relação aos níveis de 1990. Quanto aos países em desenvolvimento, China e Índia apresentaram propostas de reduções na intensidade de emissões por unidade do produto interno bruto (PIB) até 2030, se comprometendo com metas de 60% a 65% e 33% a 35% abaixo do nível de 2005, respectivamente.

O Brasil, por sua vez, comprometeu-se em reduzir as emissões de GEE em 37% em relação aos níveis de 2005, até 2025, além de uma contribuição indicativa de reduzir as emissões em 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030. O diferencial da proposta brasileira é o comprometimento com uma meta absoluta, inédito no contexto brasileiro.⁷

Ao se comprometer com uma meta absoluta, o Brasil enfrentará o desafio de crescer economicamente ao mesmo tempo que reduz suas emissões. Para alcançar suas metas, o governo brasileiro expressou seu comprometimento com o reflorestamento de áreas degradadas, combate ao desmatamento, ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética e aumento na eficiência elétrica, notadamente.

Embora a INDC brasileira proponha medidas em grande escala relacionadas ao uso da terra e recuperação de florestas para reduções de emissões de GEE, destaca-se a queda de importância dessa fonte de emissões, dado que a taxa de desmatamento no Brasil, entre 2005 e 2012, sofreu um declínio considerável

7. A meta voluntária estabelecida durante a COP15, realizada em Copenhague na Dinamarca, em 2009, consistia em uma redução relativa, ou seja, redução das emissões por unidade do PIB.

(Brasil, 2014). Espera-se, dessa forma, uma redução da participação desta fonte de emissões, de tal forma que deixe de ser a principal fonte de emissões no país.

Apesar de existir apenas uma breve citação no texto oficial da INDC de que o Brasil pretende incentivar tecnologias de baixo carbono para os setores de indústria e transporte, as emissões derivadas do uso de combustíveis e dos processos produtivos devem assumir mais importância nos próximos anos, devido às tendências de aumento das emissões dos setores energético, industrial, de transporte e refino de petróleo (Brasil, 2014).

Dessa forma, tendo em vista a meta de redução de emissões propostas pela INDC brasileira, acordada na COP21, bem como algumas de suas propostas para o seu cumprimento, este artigo tem como objetivo projetar cenários alternativos para a economia brasileira, simulando os prováveis impactos que políticas mitigatórias, como a imposição de metas de redução de emissão de carbono, terão sobre a estrutura produtiva nacional.

Em suma, este estudo busca fornecer, como contribuição à literatura empírica, simulações dos possíveis efeitos que a adoção da meta absoluta de redução de 37% das emissões em relação a 2005 terá sobre a economia brasileira. Para tal, utiliza-se um modelo de equilíbrio geral computável (EGC), o Brazilian Energy and Greenhouse Gas Emissions General Equilibrium Model (BeGreen). Este modelo apresenta uma estrutura dinâmico-recursiva que, junto a um módulo de especificação energética e um módulo ambiental, o capacita à análise de políticas de redução de GEE sobre a economia brasileira. Este tipo de modelagem tem se consolidado nas análises de impactos de políticas de redução de emissões de GEE, uma vez que os modelos EGC são capazes de considerar, de forma interligada, os efeitos sobre preços, quantidades e estrutura da economia como um todo.

O BeGreen permite impor metas de redução de emissões sobre a economia, que se traduzem em preços de carbono sobre as diferentes fontes emissoras de GEE (combustíveis e setores produtivos) e diferentes usuários, incluindo setores e famílias. Com isso, a política de imposição de metas de redução de emissões neste modelo assume a forma de uma precificação de carbono, afetando os preços relativos e, conseqüentemente, o uso de insumos energéticos, processos produtivos e o nível de atividade e emissões. Por sua vez, emissões provenientes de mudanças no uso da terra não são consideradas no modelo.

Este trabalho está dividido em mais cinco seções. Na seção 2, faz-se uma breve discussão sobre os aspectos econômicos das políticas de mitigação de emissões. Em seguida, apresenta-se a metodologia empregada (modelo e base de dados) e, posteriormente, os resultados encontrados. Por fim, tecem-se as considerações finais.

2 ASPECTOS ECONÔMICOS DAS POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO DE EMISSÕES

A mitigação das emissões de GEE – entendida como a soma de esforços na redução de emissões antropogênicas e na remoção do carbono atmosférico via sumidouros naturais, como oceanos e florestas – pode ser vista como um bem público. A ausência de direitos de propriedade bem definidos, inerente aos bens públicos, junto ao fato de que os benefícios da mitigação são percebidos de forma heterogênea e apenas em um tempo futuro, suscitam a necessidade do estabelecimento de intervenções de políticas públicas para que seu objetivo – a manutenção da dinâmica climática em níveis favoráveis à vida natural e humana – seja alcançado.

Nesse sentido, o bem público *mitigação das emissões de GEE* atua como corretor das externalidades negativas produzidas pelas emissões. Seus benefícios são globais, porém seus custos são a princípio arcados pelos poluidores, até o ponto em que se igualem, na margem, aos custos ocasionados pelas próprias emissões. Assim, quando o custo marginal de uma política de mitigação se iguala aos benefícios auferidos pela sociedade em sua decorrência, tem-se um nível ótimo em termos de custo-benefício social.

Na prática, entretanto, as tentativas de estabelecer pontos ótimos para as políticas de mitigação esbarram no problema da valoração econômica dos benefícios trazidos por ela. A complexidade e a subjetividade associadas ao valor do capital natural (que inclui uma grande quantidade de diferentes recursos e serviços ecossistêmicos associados) tornam a análise inconclusiva (ou questionável, no melhor caso) quanto à determinação do nível ótimo de mitigação a ser buscado por meio de políticas públicas.⁸ Contorna-se o problema da valoração ambiental ao adotar a análise de custo-efetividade, em que metas de controle de emissões são definidas *a priori* e apenas os custos de tal controle são contabilizados.

Políticas de mitigação de emissões podem ser de cunho regulatório ou econômico. No primeiro caso, limites de emissão são fixados pela legislação, ao passo que políticas econômicas são baseadas em incentivos contrários à emissão, como taxas, impostos, subsídios ou mesmo a instauração de mercados de carbono. A preferência por políticas do segundo tipo é comumente justificada por sua maior flexibilidade e eficiência econômica, que levaria ao objetivo desejado com menores custos, dadas as diferenças observadas nas estruturas produtivas dos diversos setores da economia em termos de intensidade de emissões, além de fomentar a busca por novas tecnologias ambientalmente satisfatórias (Nordhaus, 2008).

8. O método de valoração ambiental mais tradicional, denominado pesquisa de contingência, é baseado em questionários sobre o quanto as pessoas pagariam ou gostariam de receber, respectivamente, pela manutenção ou degradação de determinado capital natural. Tal método, todavia, sofre inúmeras críticas devido a resultados contraditórios. Para mais detalhes do assunto, ver Knetsch e Sinden (1984).

Nordhaus (2008) também classifica as políticas econômicas de mitigação de emissões de acordo com objetivos pré-estabelecidos. Estes incluem os alcances descritos adiante.

- 1) Níveis ótimos de emissões e preços de carbono, em termos de eficiência econômica.
- 2) Os mesmos níveis ótimos, porém, associados a limites máximos para as concentrações de carbono na atmosfera em relação a períodos pré-industriais.
- 3) Níveis ótimos associados a limites máximos para incrementos da temperatura global em relação a 1990.
- 4) Metas impostas pelo Protocolo de Kyoto.
- 5) Resultados mais ousados, via adoção de novas tecnologias ou de baixas taxas de retorno (entendidas como taxas de desconto intertemporal) específicas para investimentos que apresentam impactos sobre o clima (Stern, 2007).

Em mercados de carbono, uma vez estabelecidos limites para as emissões de GEE de cada país (em toneladas de CO₂-equivalente), o mecanismo de livre ajuste de preços relativos levaria à minimização dos custos necessários ao alcance das metas. Firms com menores custos marginais de redução de emissões adotariam mais medidas de controle; firms com maiores custos marginais optariam pela compra do direito de emissão adicionais, provenientes de firms cujas emissões se mantiveram aquém do esperado. A precificação do carbono desestimularia a demanda por insumos e produtos intensivos nesse elemento. Trata-se, portanto, de taxas pigouvianas de internalização de custos ambientais (Pigou, 1920).

A precificação do carbono, na prática, envolve a distribuição de direitos de propriedade, ou seja, direitos de emissão de certa quantidade de toneladas de CO₂-equivalente, na forma de licenças. Há assim uma alocação inicial de um bem, e as decisões dos agentes (reduzir as emissões ou adquirir licenças para emissões adicionais) determinarão de forma endógena o custo marginal adicional – o preço do carbono – resultante da política.

Em anos mais recentes, a literatura tem se dedicado a estudar os efeitos de políticas de redução de emissão de GEE (Manne e Richels, 1991; Jorgenson e Wilcoxon, 1993; Weyant, 1993; Viguier, Babiker e Reilly, 2003; Springer, 2003; Manne, 2005; Nordhaus, 2008; Rose, 2009; Clarke *et al.*, 2009). Para a economia dos Estados Unidos e utilizando um modelo EGC intertemporal, Jorgenson e Wilcoxon (1993), por exemplo, comparam os efeitos de taxas baseadas no conteúdo de carbono dos combustíveis fósseis com aqueles observados para taxas relacionadas ao conteúdo de energia desses combustíveis, assim como taxas *ad valorem* sobre seu uso.

Para o mesmo nível de reduções, os resultados obtidos indicaram um *trade-off* entre os impactos econômicos globais restritos a setores associados à extração de combustíveis fósseis. As taxas relacionadas ao conteúdo de carbono apresentariam os menores impactos negativos sobre a economia como um todo, conjugados com grandes efeitos sobre tais setores específicos. Por sua vez, as taxas *ad valorem* agiriam com mais intensidade sobre a economia e com menores impactos relativos sobre as atividades de extração. Taxas fundamentadas no conteúdo energético de combustíveis fósseis levariam a cenários intermediários.

No Brasil, a literatura sobre o tema é relativamente recente. Entre as aplicações que consideram políticas de redução das emissões de GEE, é possível destacar: Guilhoto, Lopes e Motta (2002); Tourinho, Motta e Alves (2003); Rocha (2003); Lopes (2003); Hilgemberg e Guilhoto (2006); Feijó e Porto Junior (2009); Margulis e Dubeux (2010); Silva e Gurgel (2012); e Gurgel (2012) e Magalhães (2013). Conforme se pode observar, a literatura nacional sobre a análise de impactos de políticas de mitigação ou de baixo carbono ainda tem alto potencial de desenvolvimento. A maior parte dos modelos utilizados se baseia em modelos de insumo-produto ou modelos estáticos de EGC agregados.

Tourinho, Motta e Alves (2003) examinam uma política de tributação de emissões para a economia brasileira, utilizando um modelo EGC estático e três diferentes preços por tonelada de carbono emitida. Os resultados apontaram uma redução no nível de emissões, com a transferência de recursos de setores mais intensivos para aqueles menos intensivos em emissões, além de queda no valor da renda das famílias e no PIB do país e aumento do investimento total.

Hilgemberg e Guilhoto (2006) aplicam um modelo inter-regional de insumo-produto a seis regiões brasileiras. Estes autores quantificam as emissões de carbono decorrentes do uso energético de gás natural, álcool e derivados de petróleo, relacionando-as no nível de atividade e identificando as parcelas de emissões provenientes de cada combustível em razão da demanda final, do consumo intermediário e das famílias. Os efeitos de restrições sobre as emissões e de um imposto sobre as emissões são avaliados por meio de simulações que, entre outros resultados, destacam os produtos de consumo das famílias, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, como alvos prioritários de políticas de redução de emissões.

Feijó e Porto Junior (2009) utilizam um modelo multirregional de EGC para avaliar os impactos sobre a redução de emissões e sobre a economia brasileira das propostas trazidas pelo Protocolo de Kyoto, incluindo a possibilidade de estabelecimento de um mercado de carbono. Os resultados corroboram o *trade-off* existente entre eficiência alocativa e redução de emissões e apontam para as vantagens econômicas associadas à alternativa apresentada por tais mercados.

Silva e Gurgel (2012) adotam um modelo EGC dinâmico-recursivo para a economia mundial, no qual, entre 2015 e 2050, quedas progressivas de 3% a 30% nas emissões setoriais acarretam perdas acumuladas de 1% a 2% no PIB em relação a 2004. As emissões se reduzem em 54% em relação ao cenário-base, com perdas menores do que 1% em termos de bem-estar. Os autores enfatizam o papel das fontes de energia limpa na matriz energética brasileira, com destaque para a geração hidroelétrica, sobre o reduzido impacto econômico previsto pelo modelo. Gurgel (2012), utilizando o mesmo modelo (que considera mudanças no uso da terra e mercados de carbono setoriais) e visando avaliar as propostas firmadas durante a COP17, em 2011 (reduções entre 36,1% e 38,9% até 2020, em relação às projeções de referência do governo brasileira à época), ratifica tais resultados, com baixos impactos sobre o PIB brasileiro em 2020 (0,2%). Por seu turno, para 2050, as perdas poderiam chegar a 4% do PIB, resultado da baixa eficiência da política de mercados de carbono setoriais.

Este artigo contribui com essa literatura ao avaliar a meta inédita de redução absoluta de emissões proposta pelo Brasil na COP21, em 2015, por meio de um modelo EGC dinâmico-recursivo com detalhamento energético e ambiental.

3 METODOLOGIA

Modelos EGC utilizam a base teórica do equilíbrio geral walrasiano e sua formalização por Arrow e Debreu (1954) para a elaboração de um modelo parametrizado de uma economia real com solução numérica (Shoven e Whalley, 1992). Tais modelos possibilitam a simulação dos efeitos de diferentes tipos de choques sobre a alocação de recursos na economia, sendo em geral empregados com o intuito de se preverem e avaliarem os impactos de políticas econômicas.

Desde o trabalho de Johansen (1960), modelos EGC evoluíram muito em termos de aplicação. Sua versatilidade possibilita aplicações em áreas bastante diversificadas, como finanças públicas, comércio internacional, desenvolvimento, distribuição de renda e política ambiental e energética, entre outras (Devarajan e Robinson, 2002). De acordo com Dixon e Rimmer (1998), modelos EGC também podem ser utilizados na projeção de cenários econômicos a partir de uma base de dados detalhada e fornecida por especialistas.

Modelos EGC tratam a economia como um sistema de mercados inter-relacionados, no qual o equilíbrio em todas as relações tem de ser obtido simultaneamente, o que não ocorre em modelos de equilíbrio parcial. A hipótese de preços flexíveis determinados endogenamente torna possível a avaliação da realocação de recursos em resposta a variações nos preços relativos; a mobilidade dos fatores primários e a possibilidade de substituição entre insumos são também características importantes dos modelos EGC (Domingues, 2002).

A aplicação de modelos EGC na avaliação de impactos de políticas ambientais se deve aos seus efeitos sobre o comportamento dos agentes e, conseqüentemente, sobre preços e quantidades na economia. Assim, os impactos de impostos, subsídios, quotas e transferências de renda no contexto da regulação ambiental podem ser avaliados por meio dessa ferramenta (Wing, 2004). Segundo Tourinho, Motta e Alves (2003), é possível analisar a circularidade implícita nesse processo: a economia afeta o meio ambiente e este efeito impacta a economia. Assim, um modelo EGC é uma ferramenta adequada para que seja possível alcançar os objetivos propostos anteriormente.

Xie e Saltzman (2000) caracterizam modelos EGC aplicados a problemas ambientais como modelos que tornam endógenos os efeitos da poluição nas funções de produção ou utilidade. Os autores alertam para o problema da especificação incompleta das interações entre atividades econômicas e ambientais, além da dificuldade de obtenção de dados ambientais bem definidos que permitam a especificação numérica dos modelos.

Segundo Adams, Horridge e Parmenter (2000), três características de modelos EGC contribuem para a sua capacidade de análise do problema das emissões de GEEs: i) um módulo de quantificação do uso de energia e de emissões para cada setor e região do modelo; ii) equações que permitam a substituição entre fontes de geração de energia elétrica por região; e iii) mecanismos que permitam, de forma endógena, o abatimento de créditos de carbono em resposta a políticas mitigatórias. Ainda, Weyant (1993) aponta os determinantes de projeções voltados à redução de emissões: i) premissas do cenário-base; ii) especificações do cenário com controle de emissões; iii) estrutura do modelo empregado; e iv) cálculos dos custos das medidas consideradas.

Em modelos EGC que seguem o padrão estabelecido por Johansen (1960), as equações do modelo são linearizadas e as soluções são apresentadas em variação percentual. O primeiro de tais modelos foi denominado ORANI (Dixon *et al.*, 1982), cuja evolução deu origem ao MONASH (Dixon e Parmenter, 1996). A versatilidade e orientação prática de modelos como o MONASH possibilitam seu emprego em diversas aplicações, sendo capaz de executar simulações de estática comparativa e projeção (Dixon, Koopman e Rimmer, 2013). Nesses modelos, os efeitos de políticas públicas e outros choques não são independentes da projeção de referência ou cenário-base da economia, sendo esta, portanto, crucial para a análise dos efeitos de tais políticas (Dixon e Rimmer, 1998).

3.1 Modelo BeGreen

O BeGreen é um modelo EGC que segue a abordagem proposta por Johansen (1960), apresentando uma estrutura matemática representada por um sistema de equações lineares e com variáveis na forma de taxas de variação percentual. Os principais avanços incorporados ao BeGreen e que o diferenciam dos demais modelos EGC brasileiros são: i) um módulo de detalhada especificação energética; ii) um módulo ambiental para projeção de políticas de redução de emissões; e iii) uma estrutura de dinâmica recursiva (Magalhães, 2013). Além disso, o modelo é calibrado para os dados mais recentes do Sistema de Contas Nacionais (SCN) e da matriz de insumo-produto (IBGE, 2007a), além do Inventário Brasileiro de Emissões (Brasil, 2010).

O modelo é multiproduto, composto por 124 produtos e 58 setores. Ademais, o modelo conta com catorze componentes da demanda final, contemplando consumo das famílias (dez famílias representativas) e do governo, investimento, exportações e estoques. Há também três elementos de fatores primários (capital, trabalho e terra), dois setores de margens (comércio e transportes), importações por produto para cada um dos 58 setores e 14 componentes da demanda final, um agregado de impostos indiretos e um agregado de impostos sobre a produção. Sua estrutura central é composta por blocos de equações que determinam relações de oferta e demanda, derivadas de hipóteses de otimização, e condições de equilíbrio de mercado.

Com relação à estrutura de produção, cada setor faz uso de insumos energéticos, insumos intermediários e fatores primários. Em cada setor, as firmas apresentam um comportamento otimizador, buscando uma combinação de insumos de modo a minimizar o custo de produção para um dado nível de produto, condicionado a tecnologias de retornos constantes de escala. Um avanço incorporado neste modelo é agrupar os setores produtivos em duas categorias distintas, a saber: i) setores com tecnologias de produção com vetores tecnológicos; e ii) setores com estruturas de substituição entre compostos energéticos.

Em relação a esse primeiro grupo, a especificação de vetores tecnológicos possibilita a introdução de uma restrição sobre a substituição entre os insumos utilizados pelas firmas, tornando-a consistente com as características de tecnologias específicas e conhecidas. Isto evita a possibilidade de obtenção de substituição ou combinação de insumos tecnicamente não factíveis, tratando de forma mais realista o padrão de uso dos insumos e a resposta deste a variações nos preços. No modelo BeGreen, dois setores se enquadram nesta categoria por apresentarem tecnologias de produção bem caracterizadas: *geração de eletricidade e fabricação de aço e derivados*.

Os demais setores produtivos se enquadram no segundo grupo, ou seja, com estrutura de substituição entre compostos energéticos. Neste caso, as firmas escolhem a composição de insumos energéticos entre os seguintes três compostos: renovável, autogeração de energia elétrica e não renovável. O primeiro é definido pela escolha de uma composição de insumos energéticos renováveis, assim como o composto não renovável baseia-se no conjunto de insumos não renováveis. Outro diferencial desta especificação é a possibilidade de substituição entre autogeração de energia hidroelétrica e energia térmica.

No modelo BeGreen, existem dez famílias representativas que consomem bens domésticos e importados. Tais famílias estão desagregadas de acordo com decis de renda obtidos a partir dos dados da Pesquisa de Orçamento Familiar – POF (IBGE, 2007b), referente ao período 2002-2003. Deles obtém-se a classificação das famílias por faixa de renda mensal, $i = 1, 2, \dots, 10$, mensurada por unidade de consumo. Em seguida, foram criadas as frações de renda consumida para cada item da matriz, para as dez famílias representativas por decil de renda. A tabela 1 retrata as principais características dos decis de renda pela POF 2002-2003.

TABELA 1
Características dos decis de renda pela POF – Brasil (2002-2003)

Decil	Número de observações	População correspondente	Renda média (R\$)	Desvio-padrão (R\$)	Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)
1	6.730	4.877.783	210,71	68,96	4,00	305,00
2	6.158	4.836.322	379,11	43,59	306,00	453,00
3	5.606	4.869.806	523,81	40,63	454,00	596,00
4	5.190	4.846.089	674,80	47,17	597,00	758,00
5	4.921	4.843.652	859,31	60,67	759,00	970,00
6	4.390	4.861.636	1.103,00	80,07	971,00	1.246,00
7	4.225	4.847.143	1.431,09	115,03	1.247,00	1.652,00
8	3.972	4.845.858	1.954,89	195,15	1.653,00	2.341,00
9	3.687	4.853.007	3.000,83	441,40	2.342,00	3.878,00
10	3.689	4.853.342	8.000,76	6.617,35	3.881,00	385.250,00

Fonte: IBGE (2007b).
Elaboração dos autores.

A especificação da demanda das famílias é baseada num sistema combinado de preferências CES/Klein-Rubin, com as equações de demanda derivadas a partir de um problema de maximização de utilidade. Essa especificação dá origem ao sistema linear de gastos (LES), no qual a participação do gasto acima do nível de subsistência, para cada bem, representa uma proporção constante do gasto total de subsistência de cada família. A substituição entre bens domésticos e importados é feita a partir da função CES.

Em relação à demanda por investimento e estoque de capital, tem-se que os “investidores” escolhem os insumos utilizados no processo de criação de capital pelo processo de minimização de custos, sujeito a uma estrutura de tecnologia hierarquizada. No primeiro nível, o bem de capital é produzido por insumos domésticos e importados, cuja combinação é especificada por uma função CES. Em seguida, um agregado do conjunto dos insumos intermediários compostos é formado pela combinação em proporções fixas (função Leontief), o que define o nível de produção do capital do setor.

O mercado de trabalho no BeGreen apresenta um elemento de ajuste intertemporal, envolvendo as seguintes três variáveis: salário real, emprego atual e emprego tendencial. Dado que existe uma relação negativa entre emprego e salário real, o nível de emprego é ajustado até convergir para o nível tendencial. Com isso, enquanto o emprego estiver acima (abaixo) do nível tendencial, o desvio do salário real aumentará (reduzirá).

Todos os bens no modelo BeGreen são definidos com curvas de demanda negativamente inclinadas aos próprios preços no mercado mundial, em que se opera com equações de equilíbrio de mercado para todos os bens consumidos localmente, tanto domésticos quanto importados. Existem também equações de equilíbrio no mercado de fatores (capital e trabalho). Um vetor de elasticidades define a resposta da demanda externa a alterações no preço *free on board* (FOB) das exportações. O consumo do governo é determinado exogenamente, não sendo este agente modelado como otimizador.

A demanda por variação de estoques está conectada no nível de produção do bem. Dessa forma, o volume de estoques, doméstico ou importado, de cada bem, varia de acordo com a produção doméstica desse bem. As demandas por margens (transporte e comércio), por sua vez, são proporcionais aos fluxos de bens aos quais elas estão associadas.

A estrutura dinâmica recursiva do BeGreen tem sua especificação baseada na modelagem do comportamento intertemporal e em resultados de períodos anteriores (*backward looking*). As condições econômicas correntes são endogenamente dependentes dos períodos posteriores, mas permanecem não afetadas por expectativas de períodos futuros (*forward-looking*). Deste modo, o investimento e o estoque de capital seguem mecanismos de acumulação e deslocamento intersetorial a partir de regras pré-estabelecidas, associadas à taxa de depreciação e às taxas de retorno. Além disso, assume-se um amortecimento das respostas do investimento.

Por fim, o módulo ambiental acoplado ao BeGreen foi inspirado no modelo *Monash Multi-Regional Forecasting-Green* (MMRF-Green), discutido em detalhes por Adams, Horridge e Parmenter (2000). Sua incorporação permite tratar as emissões de forma detalhada, separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias),

e atividade emissora. As emissões no modelo estão associadas ao uso de combustíveis, sendo doze combustíveis no total, ou no nível de atividade do setor. A emissão proveniente do uso de combustíveis é modelada como diretamente proporcional a seu uso, assim como as emissões de atividade em relação ao produto das indústrias relacionadas. Não há no modelo inovações tecnológicas endógenas para o caso do uso de combustíveis fósseis, que, por exemplo, permitam que a queima de carvão libere menos CO₂ por tonelada utilizada.⁹

O modelo calcula endogenamente o preço do carbono, ou custo de redução de emissões, pela imposição de metas de emissões de GEE. Esse módulo é responsável pela transformação destes preços ou impostos físicos da taxa de carbono em alíquotas *ad valorem*, que alimentam o núcleo do modelo. A partir dos resultados de determinadas variáveis (uso de combustível pelos setores, nível de atividade e consumo das famílias), o módulo ambiental calcula as variações nas emissões.

3.2 Base de dados

3.2.1 Base de dados energética

O BeGreen contém uma detalhada especificação de setores, produtos e parâmetros relacionados à questão energética brasileira. Este modelo utiliza principalmente dados do Ministério de Minas e Energia (MME), de agências reguladoras do setor energético – especialmente a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Por sua vez, a principal fonte para a desagregação foi o Balanço Energético Nacional Consolidado para o ano de 2005 (EPE, 2010).

Nos setores de geração de eletricidade e fabricação de aço e derivados, utilizaram-se estruturas de produção com vetores tecnológicos. Para estes casos, o padrão de insumo empregado representa a média de uma determinada tecnologia no setor, obtido a partir de publicações especializadas (EPE, 2010; Aneel, 2005). Como esta especificação requer dados sobre as características dos insumos utilizados em cada tecnologia do setor, a intensidade de dados torna-se sua principal limitação prática, impedindo que todos os setores do modelo utilizassem a mesma estrutura de produção.

3.2.2 Base de dados ambiental

As emissões derivadas de combustíveis foram obtidas da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE), a partir de um aplicativo desenvolvido pelo grupo de pesquisa Economia & Energia (EPE, 2010). Estas emissões foram alocadas para cada setor de uso de acordo com a utilização do combustível. Ademais, os

9. Os setores, por sua vez, podem reduzir suas emissões pela substituição de insumos energéticos, via mudança de preços relativos.

combustíveis associados às emissões foram: petróleo, gás natural, carvão metalúrgico, carvão mineral, lenha, carvão vegetal, bagaço de cana, gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, álcool, óleo combustível, óleo *diesel*, querosene, coque e outros produtos do refino.

As emissões associadas ao processo produtivo dos setores foram obtidas do segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2010). Vale destacar, ainda, que, para a transformação de emissões em uma unidade comum, CO₂ equivalente (CO₂-equivalente), foram utilizados coeficientes de emissões obtidos do Relatório Stern (Stern, 2007).

4 EMISSÕES POR SETORES

Conforme a segunda edição das *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil* (Brasil, 2014), as emissões podem ser classificadas de acordo com sua origem, consoante descrito a seguir.

- 1) Setor de energia, que compreende a produção, a transformação e o consumo de energia, incluindo emissões resultantes da queima de combustíveis e as resultantes de fugas na cadeia de produção, transformação, distribuição e consumo de energia.
- 2) Processos industriais, cujas emissões são resultantes dos processos produtivos nas indústrias, exceto da queima de combustíveis. Dividem-se em produtos minerais, indústrias química e metalúrgica, e produção e utilização de hidrofluorcarbonos (HFC) e hexafluoreto de enxofre (SF₆).
- 3) Agropecuária, com emissões provenientes da fermentação entérica do gado, do manejo de dejetos animais, do óxido nitroso (NO₂) liberado em solos agrícolas, do cultivo de arroz em campos inundados e da queima de resíduos agrícolas.
- 4) Mudança no uso da terra e das florestas, em função das emissões e remoções resultantes das variações da quantidade de carbono contida na biomassa vegetal e no solo que ocorrem durante a transição entre os seus diversos usos: vegetação nativa, agricultura, pastagem, vegetação secundária, reflorestamento, área urbana, áreas alagadas e reservatórios, entre outros. As emissões de CO₂ por aplicação de calcário em solos agrícolas também se enquadram nesse tipo de origem.
- 5) Setor de tratamento de resíduos, subdividido em disposição de resíduos sólidos e tratamento de esgoto doméstico, comercial e industrial, além da incineração de resíduos.

A participação de cada um dos cinco setores antes citados, junto à sua evolução entre 2005 e 2012, está ilustrada na tabela 2. A participação do setor *mudança no uso do solo e florestas* nas emissões totais apresentou forte queda no período, de 58% para 15%. Tal fato pode ser explicado principalmente pela queda das taxas de desmatamento na Amazônia Legal (Brasil, 2014). Entretanto, todos os outros quatro setores apresentaram crescimento no mesmo período, com destaque para o setor energético, cujo aumento de 36% nas emissões sugere uma importância crescente do setor (junto à agropecuária, com igual participação nas emissões totais em 2012) na formulação de políticas públicas para a mitigação de emissões de GEE. Apesar da centralidade do papel das políticas contra o desmatamento, há, portanto, uma necessidade cada vez maior de se adotarem ações de controle mais efetivas sobre as emissões originadas pela estrutura produtiva propriamente dita, em que se observem a relevância do setor energético e da agropecuária.

Convém observar que as emissões totais em 2012 foram 41% menores do que em 2005. Assim, a meta proposta pelo governo brasileiro na COP21 traz na verdade o desafio de se manterem as emissões totais próximas às de 2012: até 4% maiores em 2025 e 2% menores em 2030. Em um cenário de crescimento econômico, trata-se então de desacoplar a expansão dos setores de energia, agropecuária, processos industriais e tratamento de resíduos, da emissão de GEE, partindo-se da premissa de que a redução das emissões advindas das mudanças no uso do solo e florestas já observadas até 2012 não apresentem reversões significativas.

TABELA 2
Emissões por setores, participação e evolução (2005-2012)

Setores	2005		2012		Variação (2005-2012) (%)
	Gg de CO ₂ -e ¹	Participação (%)	Gg de CO ₂ -e ¹	Participação (%)	
Energia	328.377	16	446.154	37	36
Processos industriais	77.943	4	85.365	7	10
Agropecuária	415.724	20	446.445	37	7
Mudança no uso do solo e florestas	1.179.067	58	175.685	15	-85
Tratamento de resíduos	41.887	2	49.775	4	19
Total	2.042.998	100	1.203.424	100	-41

Fonte: Brasil (2014).

Nota: ¹ Gigagrama de gás carbônico equivalente.

Nesse cenário, fica evidente a importância da construção de modelos preditivos que, mesmo não incorporando os efeitos da dinâmica das mudanças no uso do solo e das florestas, possam indicar que tipo de impacto econômico é esperado pela implementação de políticas de carbono com imposição de metas de emissões sobre a estrutura produtiva brasileira.

4.1 Atualização dos dados de emissões, choque e cenários simulados

Dada a disponibilidade das informações de emissões de 2005 a 2012, realizou-se uma atualização dos dados de forma setorizada – com base em Brasil (2014) –, ponderando de acordo com os volumes de produção setoriais. Para 2013 e seguintes, até 2025, foram simulados, de forma recursiva, um cenário-base e um cenário de política ambiental. O choque aplicado sobre as emissões, que corresponde à operacionalização da política ambiental, reflete a diferença entre os cenários, sendo calculado de forma que a meta de emissões sob análise seja atingida em 2025 (37% de redução absoluta em relação a 2005), com restrições anuais de emissões totais aplicadas uniformemente.

Nesse cenário de política, os limites impostos às emissões aplicam-se àquelas provenientes do uso de energia e da atividade produtiva dos setores, incluindo, por exemplo, as emissões decorrentes da produção agropecuária. O preço do carbono para se atingir determinada meta pode ser interpretado não somente como um imposto corretivo pigouviano (Pigou, 1920), mas também como o custo de redução de emissões com o qual os agentes econômicos, de forma agregada, se deparariam dada a imposição de uma meta (ou limite) de emissões. Endogenamente, o modelo calcula esse custo ou preço de carbono.

O fechamento selecionado (definição das variáveis exógenas e endógenas no modelo) seguiu o padrão para modelos de dinâmica recursiva. As condições de equilíbrio dos mercados são caracterizadas pela alocação de bens e fatores produtivos de tal forma que: i) os preços endogenamente determinados ajustem todos os mercados; ii) todos os agentes se deparem com restrições orçamentárias; e iii) o nível total de emissões atenda à meta de redução de emissões. O modelo é walrasiano e, portanto, determina apenas os preços relativos, com a taxa de câmbio nominal como numerário.

As principais variáveis macroeconômicas são endógenas no cenário da política (apenas os gastos do governo são exógenos). Em modelos dinâmicos recursivos, o aumento do investimento implica reduções das taxas esperadas de retorno, via aumento do estoque de capital, amortecendo as respostas do investimento até seu estado estacionário (equilíbrio). Por seu turno, os salários reais vão responder a aumentos de emprego até o momento em que o equilíbrio do mercado de trabalho for restabelecido. No modelo, as estruturas comerciais internacionais são exógenas, sendo o Brasil modelado como uma pequena economia aberta. Nas simulações em que a restrição nas emissões totais é imposta (exógena), o preço do carbono de equilíbrio é determinado endogenamente pelo modelo e são repassados nos preços pagos pelos usuários tanto intermediários quanto finais.

O cenário-base representa qual seria a trajetória da economia sem políticas de restrição de emissões. A evolução da economia no período 2005-2025 é baseada nos dados macroeconômicos observados entre 2006 e 2015, disponíveis na matriz

de insumo-produto nacional de 2005 (IBGE, 2007a), nos dados de comércio internacional da Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior (Funcex)¹⁰ e nos resultados da POF (IBGE, 2007b). Para o período restante, as projeções de crescimento do PIB, consumo das famílias, governo, investimento e exportações adotadas seguiram as projeções do Banco Central do Brasil (BCB, 2016). O cenário também incorpora informações sobre o aumento de eficiência energética baseado em projeções da EPE (2007). De modo geral, o cenário-base está ancorado em um crescimento médio da economia brasileira de 2,5% ao ano (a.a.) até 2025.

5 RESULTADOS

Nesta seção são analisados os resultados macroeconômicos, setoriais e por grupos de famílias. Inicialmente, serão discutidos os impactos do controle de emissões resultantes da proposta brasileira sobre algumas variáveis macroeconômicas, tais como PIB real e emprego. Em seguida, serão abordados os efeitos sobre o consumo das famílias. Finalmente, discutem-se os impactos sobre o nível de atividade e as emissões setoriais.

É importante salientar que os impactos representam a diferença das variações obtidas entre o cenário-base e o cenário com a política. Dessa forma, os resultados devem ser entendidos como desvios em relação a uma trajetória da economia brasileira (cenário-base) que não considera a política de metas de emissões.

5.1 Resultados macroeconômicos

Conforme dito anteriormente, os resultados representam uma redução relativa ao cenário-base em 2025, não devendo ser interpretados como quedas absolutas das variáveis agregadas. As relações de causalidade que explicam tais resultados encontram-se esquematizadas na figura 1. Além disso, ressalta-se a ausência de estudos similares aplicados especificamente à proposta brasileira na COP21 e que poderiam ser utilizados para fins de comparação. Gurgel e Paltsev (2014), por exemplo, ressaltam as incertezas associadas às formas de implementação da meta brasileira relativa às emissões provenientes do uso de energia e agricultura, argumentando que, apesar das dificuldades relacionadas à mensuração e ao controle de todas as fontes de emissão na economia, um mercado de carbono seria, de fato, a melhor opção. Em todo caso, os resultados macroeconômicos obtidos por Gurgel (2012) e Silva e Gurgel (2012), mencionados na seção 2 e também baseados em modelos dinâmico-recursivos, apesar de suas particularidades metodológicas, se encontram próximos aos valores apresentados a seguir.

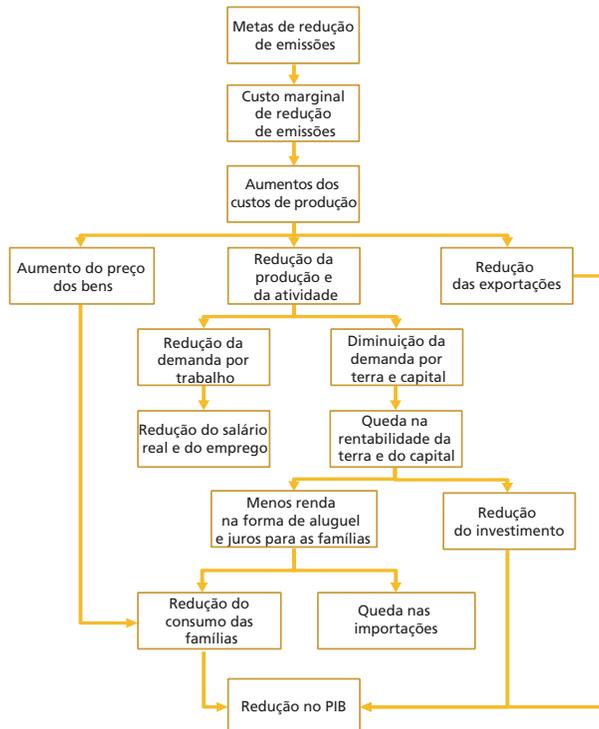
A tabela 3 apresenta os impactos macroeconômicos decorrentes da política de meta de emissões. Primeiramente, os resultados sugerem um decréscimo de -3,3% do PIB real acumulado até 2025, em relação ao cenário-base. Em outras palavras,

10. Disponível em: <<https://bit.ly/3xtr41l>>. Acesso em: maio 2016.

isso significa dizer que o crescimento do PIB passaria de 2,5% a.a. (média do cenário-base) para cerca de 2,24%, em média, até 2025, considerando a política de redução absoluta de emissões. Essa queda decorre, notadamente, dos aumentos dos custos de produção associados às metas de redução de emissões impostas aos setores ou, lido de outra forma, aos aumentos dos custos de abatimento das emissões devido a medidas de redução de emissões impostas aos setores.

A queda do PIB real está fortemente associada ao comportamento do consumo das famílias e do investimento, que no acumulado apresentaram queda de -5,24% e -5,77%, respectivamente. O consumo das famílias diminuiu sob um cenário de precificação de carbono devido ao aumento do preço dos bens, dado que acrescenta custos adicionais à produção e os preços tendem a subir na medida em que os produtores repassam o maior custo aos consumidores. As famílias respondem, assim, com um menor consumo. Além disso, os produtores diminuem a produção e o investimento, como resultado do aumento de custos e isso implica menos renda na forma de pagamentos aos fatores primários para as famílias. Com a diminuição da renda, intensifica-se a redução do consumo.

FIGURA 1
Fluxograma de relações de causalidade do modelo BeGreen



Os efeitos da menor produção e, conseqüentemente, menor demanda por trabalho incidem ainda sobre o salário real e explicam a queda do nível de emprego (-2,89% acumulados em relação ao cenário-base em 2025). As exportações também apresentaram um impacto negativo (-0,41%), embora em magnitude consideravelmente menor se comparada ao consumo das famílias e ao investimento.¹¹ Esta queda deve-se ao efeito preço, pois como a precificação de carbono eleva os custos de produção, as exportações se tornam mais caras e menos atraentes para os consumidores externos. A queda das importações está associada à queda da atividade econômica ao longo dos anos, o que provoca redução de preços domésticos para alguns bens, junto à queda simultânea na renda.

TABELA 3
Impactos macroeconômicos da meta de redução de emissões sobre a economia

Variáveis macroeconômicas	Variação (%) ¹
PIB real	-3,30
Consumo das famílias	-5,24
Investimento	-5,77
Exportações	-0,41
Importações	-5,80
Emprego	-2,89
Salário real	-14,63
Redução total das emissões	-11,09

Elaboração dos autores.

Nota: ¹ Variação percentual acumulada em 2025 – desvio acumulado em relação ao cenário-base.

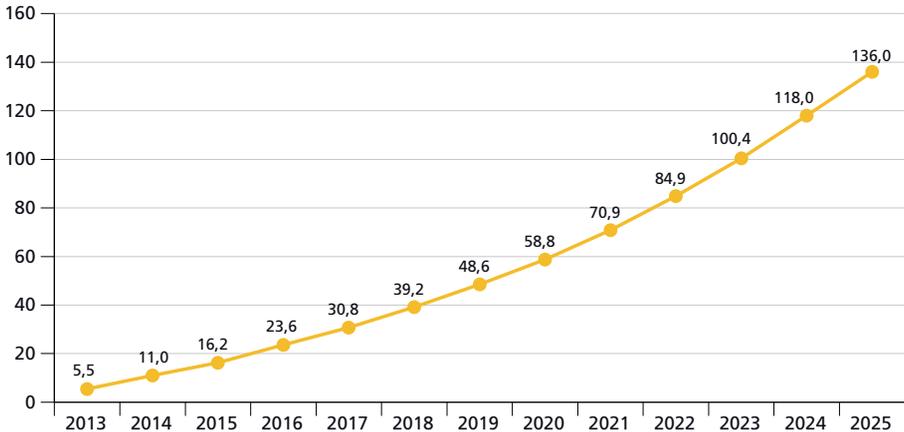
Com relação à redução total das emissões, o limite imposto de emissões no modelo levaria a uma redução de 11,09% em relação ao cenário-base, suficiente para o cumprimento da meta absoluta proposta na COP21.

O preço do carbono para se atingir determinada meta pode ser interpretado não somente como um imposto corretivo pigouviano (Pigou, 1920), mas também pode ser analisado como o custo de redução de emissões que as empresas ou setores se deparariam com a imposição de uma meta (ou limite) das suas emissões. Endogenamente, o modelo calcula este custo ou preço de carbono. Tais metas se traduzem em preços de carbono sobre as diferentes fontes de emissões de GEE (combustíveis e setores produtivos) e usuários (setores, famílias etc.). Se este mercado cobre todas as emissões e é competitivo, como assume o modelo BeGreen, o preço

11. É assumida a hipótese de país pequeno, em que as exportações variam inversamente com os preços domésticos.

do carbono será igual ao custo marginal de abatimento para uma determinada meta, que reflete o custo de redução de emissões, podendo ser também traduzido como um preço implícito ou preço sombra. Além disso, o custo marginal de abatimento será igual para todos os emissores, o que é uma condição custo-efetividade da política.

GRÁFICO 1

Trajetórias dos preços de carbono da meta de redução de emissões (2013-2025)(Em R\$/tonelada CO₂-e)

Fonte: Resultados do modelo.
Elaboração dos autores.

O gráfico 1 mostra a trajetória, ano a ano, dos preços de carbono implícitos em reais por tonelada de CO₂-e para cada meta de emissão. Uma meta progressiva de redução de emissões até 2025, por exemplo, requer preços de carbono entre R\$ 5,5/t CO₂-e e R\$ 136/t CO₂-e no fim do período.¹² Conforme se pode visualizar, tais custos têm uma escalada crescente. Estes preços estão em consonância com os encontrados na literatura especializada sobre o tema. Assim, podemos nos voltar para as análises de Stern e Nordhaus. No caso brasileiro, metas ambiciosas de redução de emissões devem estar associadas a períodos mais longos de tempo; e metas menos ambiciosas, a períodos mais curtos. A estratégia de uma meta ambiciosa em um curto período de tempo poderia impor um custo mais elevado para a economia brasileira.

12. Em termos ilustrativos, um imposto de carbono sobre a gasolina de R\$ 50/t CO₂-e, em 2025, equivaleria a R\$ 0,1825 de imposto por litro de gasolina; o mesmo imposto específico sobre o *diesel* corresponderia a R\$ 0,2005 por litro.

Os resultados encontrados estão em linha com os custos estimados de políticas de taxaço e restrição de emissões para o Brasil – por exemplo, Gurgel (2012) e Gurgel e Paltsev (2014). Cabe ressaltar que, embora os resultados sugiram uma queda apenas relativa ao cenário-base, o custo da política poderia, potencialmente, ser minimizado devido a três motivos principais. O primeiro está relacionado ao próprio objetivo do trabalho, que é estimar os custos e a incidência de políticas preço-induzidas para a parcela das emissões brasileiras decorrentes do uso de energia e da atividade produtiva. Reitera-se que foram consideradas apenas as emissões derivadas do uso de combustíveis, energia e do nível de atividade dos setores, e não aquelas relacionadas à mudança do uso da terra. Isto se justifica pelo fato de que as políticas de mitigação desta grande parcela das emissões brasileiras se basearam no controle do desmatamento, que tem um enfoque de regulação, fiscalização e controle. Se a mitigação destas emissões fosse considerada por meio de incentivos econômicos conforme os mecanismos de compensação financeira, como redução das emissões por desmatamento e degradação florestal (REDDs) ou mesmo políticas de fiscalização, os custos de alcance das metas propostas poderiam reduzir-se consideravelmente.

O segundo motivo para custos econômicos mais elevados das metas relaciona-se à própria característica teórica do modelo, que assume retornos constantes de escala e, no caso do módulo ambiental, emissões proporcionais ao nível de atividade dos setores e ao uso de energia e combustíveis. Uma diferença que se pode destacar em relação aos estudos anteriores refere-se à alta desagregação do modelo, implicando mais interações e interdependências setoriais, que podem intensificar os resultados. A análise de sensibilidade efetuada sobre os parâmetros e elasticidades mostrou que os resultados encontrados, considerando a especificação metodológica, são robustos para grande parte das variáveis (apêndice A).

Por fim, outra limitação é a de que as simulações não consideram a existência de mudanças tecnológicas endógenas ou cenários alternativos que possam reduzir as emissões dos setores ou compensar os indivíduos afetados pelas metas de emissões, com redistribuição das receitas geradas, por exemplo. A única possibilidade, no cenário simulado, é a substituição de insumos energéticos via mudança de preços relativos.

5.2 Resultados por grupos de famílias

Um resultado bastante discutido na literatura é a incidência distributiva das políticas climáticas. Os efeitos distributivos sobre as famílias da imposição de metas de redução de emissões sobre a economia podem ser analisados pelo modelo BeGreen, especificado para analisar a incidência da restrição de emissões por grupos de famílias, visto que apresenta em sua especificação dez famílias representativas, definidas de

acordo com os decis de renda total por unidade familiar. As denominações de H1 a H10 representam a desagregação das famílias baseadas em decis de renda, no qual H1 refere-se ao primeiro decil (famílias de mais baixa renda), ao passo que em H10 estão as famílias na faixa de maior renda. A tabela 4 retrata a participação das famílias no consumo, de acordo com o banco de dados do modelo.

TABELA 4
Participação das famílias no consumo e na renda média, por decil de renda (2005)

Famílias por decis de renda	Participação no consumo (%)	Renda média (R\$)
H1	3	210,71
H2	3	379,11
H3	4	523,81
H4	5	674,80
H5	6	859,31
H6	7	1.103,00
H7	9	1.431,09
H8	11	1.954,89
H9	16	3.000,83
H10	36	8.000,76
Total	100	-

Fonte: Modelo BeGreen.

É notável a participação majoritária dos maiores decis de renda no consumo das famílias. Juntos, os dois últimos decis (H9 e H10) respondem por mais da metade do valor de compras das famílias (52%). Esta participação no consumo pode ser decomposta pelos bens energéticos do modelo, de forma a apontar o padrão dos gastos de cada decil. Como pode ser visto na tabela 5, os decis mais baixos gastam uma proporção maior de sua renda com energia elétrica se comparado aos decis superiores. Em contrapartida, os últimos decis apresentam uma alta proporção do gasto em combustíveis fósseis, com especial destaque para a gasolina. No total, as famílias do menor decil de renda gastam cerca de 5,2% da renda no consumo de bens energéticos, ao passo que o mais alto decil, chega a 9,4%.

TABELA 5
Participação dos bens energéticos no consumo das famílias (2005)
(Em %)

Bens energéticos	Consumo das famílias									
	H01	H02	H03	H04	H05	H06	H07	H08	H09	H10
Lenha	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02
Carvão vegetal	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
GLP	0,26	0,25	0,29	0,34	0,42	0,6	0,69	0,92	1,17	1,24
Gasolina	0,34	0,08	0,08	0,23	0,31	0,4	0,9	1,79	2,61	5,47
Óleo <i>diesel</i>	0,1	0,17	0,08	0,19	0,15	0,13	0,17	0,24	0,28	0,31
Querosene	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01
Outros refinados de petróleo	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,11	0,14	0,14
Álcool	0,12	0,12	0,26	0,33	0,43	0,35	0,59	0,67	0,82	0,4
Energia elétrica	4,12	4,15	3,96	3,75	3,55	3,46	3,13	2,77	2,44	1,65
Gás natural	0,23	0,23	0,22	0,21	0,19	0,19	0,17	0,15	0,13	0,09
Total bens energéticos	5,2	5,1	4,9	5,1	5,1	5,2	5,8	6,7	7,6	9,4
Produtos agropecuários e alimentos	33,9	33,6	29,4	28,1	24,8	22,2	20,1	16,7	13,3	7,8
Serviços	26,5	28,0	31,5	32,3	35,5	38,3	40,7	44,0	46,9	55,5
Demais insumos intermediários	34,3	33,3	34,2	34,6	34,6	34,3	33,5	32,7	32,1	27,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Banco de dados do modelo BeGreen.

A tabela 6 apresenta os impactos da precificação de carbono sobre o consumo de cada família representativa. Nota-se um impacto diferenciado com relação aos decis. No que diz respeito ao consumo, os resultados indicam que os primeiros decis da distribuição seriam relativamente mais afetados do que os decis intermediários. O perfil de consumo possibilita entender esse efeito. Quanto maior a renda, maior a parcela do orçamento gasta em serviços e, como os serviços não emitem GEE, o efeito sobre o consumo das famílias de maior renda tende a ser menor. Além disso, deve-se levar em conta que a participação de produtos agropecuários e alimentícios se reduz à medida que se avança nos decis de renda. Portanto, dado que estes produtos acumulam aumentos de preço em decorrência da precificação de carbono, o impacto destes aumentos nos primeiros decis deve ser maior.

Por sua vez, também se observa que as famílias de maior renda (H10) apresentam elevada redução no consumo. A explicação para este resultado reside no fato de essas famílias serem as mais afetadas pelo aumento do preço dos combustíveis,

dado que apresentam uma maior parcela do gasto com este bem, comparado aos decis mais baixos.

Em relação à utilidade, *proxy* de impacto de bem-estar, ressalta-se que no modelo BeGreen o seu cálculo desconsidera mudanças de gosto ou variações no consumo de subsistência. Observa-se, ainda, que a utilidade apresenta uma tendência similar ao consumo. Novamente, nota-se que os decis de H03 a H08 apresentaram os menores recuos e que a classe de maior renda apresentou a maior queda na utilidade.

TABELA 6
Impactos sobre o consumo e a utilidade das famílias (2025)¹

Famílias	Simulações de controle das emissões de acordo com a meta proposta	
	Consumo	Utilidade
H01	-5.13	-7.89
H02	-5.08	-7.84
H03	-4.51	-6.96
H04	-4.6	-7.08
H05	-4.5	-6.94
H06	-4.3	-6.62
H07	-4.5	-6.93
H08	-4.88	-7.53
H09	-5.12	-7.9
H10	-6.11	-9.43

Fonte: Modelo BeGreen.

Elaboração dos autores.

Nota: ¹Variação em porcentagem – desvio acumulado em relação ao cenário-base.

5.3 Resultados setoriais

A seguir, apresentam-se os resultados setoriais, referentes ao nível de atividade e à evolução das emissões ao longo do período de projeção – de 2013 a 2025. Como esperado, setores com mais dependência em relação à queima de combustíveis ou com elevada intensidade de emissões nos seus processos produtivos seriam os mais negativamente afetados em termos de variação na atividade econômica. A queda setorial de emissões, por sua vez, apresentou relação menos direta com tais setores potencialmente mais poluidores, uma vez que outros setores podem apresentar menores custos marginais de redução nas emissões.

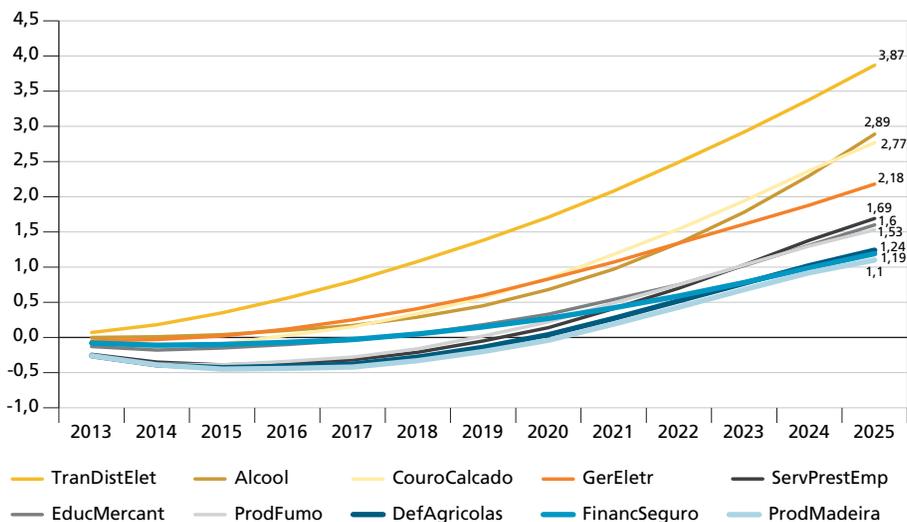
5.3.1 Nível de atividade

Os dez setores mais beneficiados pela política em termos de nível de atividade ao longo do período 2013-2025 podem ser visualizados no gráfico 2. De forma geral, trata-se de ganhos acumulados em 2025 relativamente baixos (menores do que 4% em relação ao cenário-base), especialmente se comparados com as perdas apresentadas pelos setores mais prejudicados pela política proposta. Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como o álcool, apresentaram resultados positivos em decorrência de sua menor intensidade de emissão enquanto fonte energética, servindo de alternativa em relação aos combustíveis fósseis sob o quadro de restrição imposto pela política. Outros setores com baixas emissões também se beneficiaram, pois o crescimento da economia brasileira no período foi considerado exógeno e esses setores têm, portanto, de compensar o decréscimo observado em setores mais poluidores.

GRÁFICO 2

Dez setores com maiores ganhos no nível de atividade – variação em relação ao cenário-base (2013-2025)

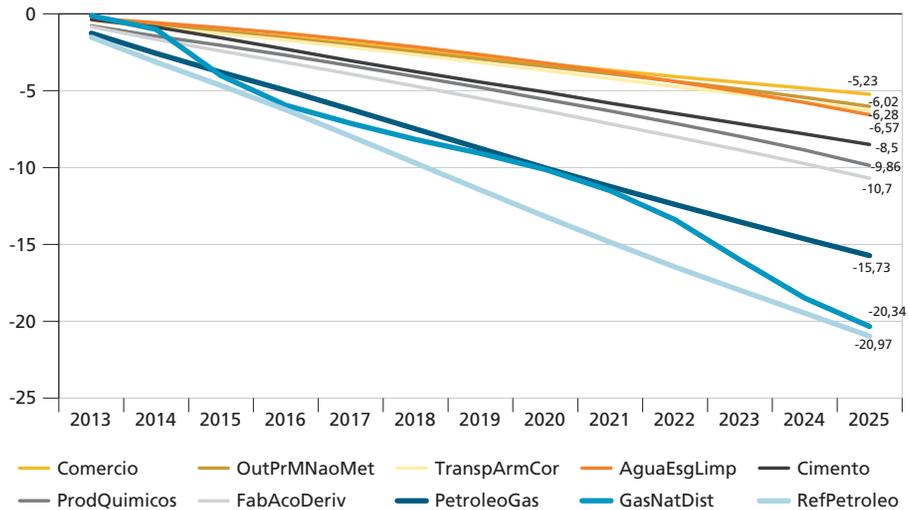
(Em %)



Fonte: Modelo BeGreen.
Elaboração dos autores.

GRÁFICO 3

Dez setores com maiores perdas no nível de atividade – variação em relação ao cenário-base (2013-2025)
(Em %)



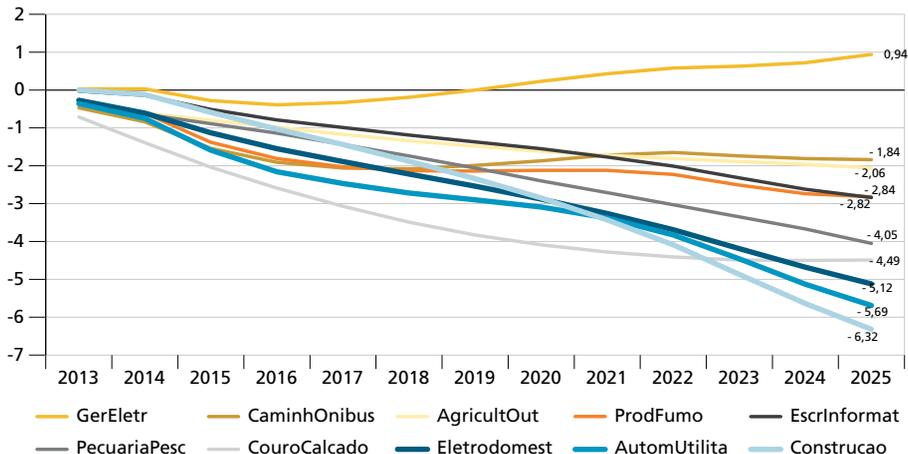
Fonte: Modelo BeGreen.
Elaboração dos autores.

Os dez setores mais prejudicados pela política, por sua vez, podem ser visualizados no gráfico 3. Nesse caso, destacam-se atividades reconhecidamente com alto potencial emissor. Os setores com perdas maiores do que 10% em relação ao cenário-base seriam refino de petróleo, distribuição de gás natural e extração de petróleo e gás – setores diretamente ligados à produção de combustíveis fósseis – e fabricação de aço e derivados, setor altamente intensivo em energia e cujo processo industrial também envolve emissões de GEE.

5.3.2 Emissões setoriais

Os resultados sugerem uma redução acumulada em 2025 nas emissões de todos os setores em relação ao cenário-base, com exceção do setor de geração de energia elétrica. Esse resultado pode ser explicado pela menor intensidade de emissões desse setor enquanto fonte energética em comparação com os combustíveis fósseis (mais especificamente pelo papel desempenhado pelas usinas hidroelétricas na matriz energética brasileira). O gráfico 4 mostra os dez setores com menores reduções (ou acréscimo, no caso da geração de eletricidade) nas emissões em relação ao cenário-base. Em geral, são setores que correspondem a atividades com alto custo marginal de redução de emissões, ou em um cenário-base em que as emissões já são reduzidas e sem a possibilidade tecnológica de substituição por insumos menos intensivos na emissão de GEE.

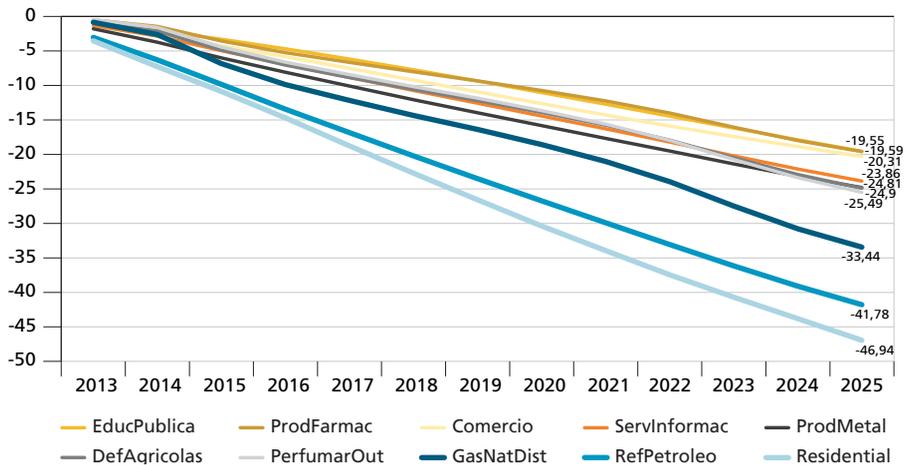
GRÁFICO 4
Dez setores com menores reduções nas emissões – variação em relação ao cenário-base (2013-2025)
 (Em %)



Fonte: Modelo BeGreen.
 Elaboração dos autores.

O gráfico 5 apresenta os dez setores com maiores reduções nas emissões em relação ao cenário-base.

GRÁFICO 5
Dez setores com maiores reduções nas emissões – variação em relação ao cenário-base (2013-2025)
 (Em %)



Fonte: Modelo BeGreen.
 Elaboração dos autores.

O setor residencial – ou consumo das famílias – apresentou a maior contribuição para a meta de emissões, com queda de quase 47%, resultado da substituição por produtos menos intensivos em emissões e, devido à ação da política, com custos relativamente reduzidos. Logo em seguida, os setores de refino de petróleo e distribuição de gás natural aparecem com as maiores reduções, por motivos explicados anteriormente. Setores como o de defensivos agrícolas apresentam baixos custos marginais de redução de emissões, o que resulta não somente na expressiva redução de emissões (cerca de 25%), mas também na variação positiva no nível de atividade do setor (aproximadamente 1%).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo simular os impactos econômicos da meta de redução de emissões de GEE contida na INDC brasileira, acordada na COP21. Para tanto, utilizou-se um modelo EGC com a finalidade de realizar projeções e analisar políticas de redução de emissões.

Destaca-se, inicialmente, o comprometimento brasileiro com a redução das emissões em 37% em relação aos níveis de 2005, até 2025, com o diferencial de ser uma meta absoluta. Apesar disso, dado que as emissões totais observadas em 2012 foram 41% menores em relação a 2005, a meta proposta na COP21 representa, na verdade, o desafio de crescer economicamente sem aumentar suas emissões.

Desse modo, assumindo um cenário no qual a economia brasileira cresceria 2,5% em média a.a., adotou-se uma estratégia de simulação de forma que a restrição sobre as emissões atendesse à meta estipulada na COP21. Os resultados apontaram um decréscimo acumulado de 3,3% do PIB real, em 2025, em relação ao cenário-base. Esta redução é explicada pelos aumentos dos custos de produção associados às metas de redução de emissões impostas aos setores, junto à redução do consumo das famílias e do investimento.

Ainda em relação ao consumo das famílias, observou-se que os efeitos da tributação de carbono são mais intensos no último decil (maior renda), dado que estas famílias são as mais afetadas pelo aumento do preço dos combustíveis. Contudo, os primeiros decis da distribuição também seriam relativamente mais afetados do que os decis intermediários devido aos efeitos dos aumentos de preço dos produtos agropecuários e alimentícios.

Em relação aos resultados setoriais, conforme esperado, entre os setores mais prejudicados em termos de nível de atividade destacam-se atividades ligadas à cadeia produtiva dos combustíveis fósseis, tais como refino de petróleo, distribuição de gás natural e extração de petróleo e gás, e setores intensivos em energia, como fabricação de aço e derivados.

Também é importante ressaltar que geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como de álcool, apresentaram variações positivas na atividade econômica em decorrência de sua menor intensidade de emissão enquanto fonte energética, servindo de alternativa em relação aos combustíveis fósseis sob o quadro de restrição imposta pela política. Ademais, em termos de emissões, nota-se uma redução acumulada em 2025 nas emissões de todos os setores em relação ao cenário-base, com exceção do setor de geração de energia elétrica. Esse resultado pode ser explicado pela menor intensidade de emissões desse setor enquanto fonte energética em comparação com combustíveis fósseis, e pelo aumento em sua atividade produtiva, conforme destacado anteriormente.

Conclui-se, portanto, que as metas propostas pela COP21 são viáveis, embora haja um custo inerente à redução das emissões, que incide diferentemente sobre setores e famílias. No caso brasileiro, os resultados da imposição de metas de redução de emissões do uso de combustíveis e das atividades produtivas apontam que metas ambiciosas de redução de emissões devem estar associadas a períodos mais longos de tempo; e metas menos ambiciosas a períodos mais curtos, devido à própria estrutura atual da matriz energética brasileira intensiva em fontes mais “limpas”. Tais custos, entretanto, poderiam ser atenuados a partir de políticas de redistribuição da receita arrecadada e também promotoras do avanço tecnológico (em termos de processos produtivos que emitem menos GEE). A adoção de políticas tecnológicas que possam dar suporte às práticas de inovação nos setores potencializaria a efetividade da política. Assim, linhas de crédito aliadas a políticas industriais, que viabilizem a inovação tecnológica e científica com o objetivo de reduzir o uso de combustíveis ou maior eficiência energética, constituem opções que poderiam tornar esse cenário mais provável.

Uma análise para além dos resultados sugere que a política de mitigação de GEE no caso brasileiro deve necessariamente incluir o controle do desmatamento como uma das principais frentes para os objetivos de custo-efetividade de uma política climática, conforme delineado na Política Nacional da Mudança do Clima (PNMC).

Algumas considerações acerca das limitações podem ser elencadas. Uma delas refere-se às hipóteses da metodologia, que é baseada em um modelo com retornos constantes de escala e sem mecanismos endógenos de mudança tecnológica, que potencialmente reduziriam a intensidade de emissões do uso de combustíveis fósseis em simulações de políticas de mitigação. Pode-se conjecturar hipoteticamente que os resultados sejam o “limite superior” dos custos que seriam impostos à economia brasileira com políticas de mitigação de GEE, dadas essas hipóteses restritivas da modelagem. Além disso, não são considerados os benefícios que a mitigação de GEE poderiam implicar, devido à dificuldade e incerteza envolvidas na mensuração dos possíveis impactos causados pelas mudanças climáticas. O certo é que, uma vez

que se observam evidências concretas das alterações ambientais globais, em que os eventos climáticos extremos tornam-se mais intensos e frequentes (IPCC, 2014), torna-se cada vez mais premente a adoção de políticas mitigatórias que garantam o desenvolvimento sustentável das gerações futuras.

REFERÊNCIAS

ADAMS, P. D.; HORRIDGE, M.; PARMENTER, B. R. **MMRF-GREEN: a dynamic, multi-sectoral, multi-regional model of Australia**. Melbourne: Monash University, Oct. 2000. (Preliminary Working Paper, n. OP-94).

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: Aneel, 2005. 243 p.

ARROW, K. J.; DEBREU, G. Existence of equilibrium for a competitive economy. **Econometrica**, v. 22, n. 3, p. 265-290, July 1954.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Focus** – relatório de mercado. Brasília: BCB, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/3UoeOIF>>. Acesso em: maio 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Brasília: MCTI, 2010. v. 1.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: MCTI, 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/3RRvEi2>>. Acesso em: out. 2015.

CLARKE, L. *et al.* International climate policy architectures: overview of the EMF 22 international scenarios. **Energy Economics**, v. 31, s. 2, p. 64-81, Dec. 2009.

DEVARAJAN, S.; ROBINSON, S. **The influence of computable general equilibrium models on policy**. Washington: International Food Policy Research Institute, Aug. 2002. (Discussion Paper, n. 98).

DIXON, P. B. *et al.* (Ed.). **Orani, a multisectoral model of the Australian economy**. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1982.

DIXON, P. B.; KOOPMAN, R. B.; RIMMER, M. The MONASH style of computable general equilibrium modeling: a framework for practical policy analysis. *In*: DIXON, P. B.; JORGENSEN, D. W. (Ed.). **Handbook of Computable general equilibrium modeling**. Amsterdam: North-Holland Publishing, 2013. v. 1, p. 23-103.

DIXON, P. B.; PARMENTER, B. R. Computable general equilibrium modeling for policy analysis and forecasting. *In*: AMMAN, H. M.; KENDRICK, D. A.;

RUST, J. (Ed.). **Handbook of computational economics**. Amsterdam: Elsevier, 1996. v. 1, p. 3-85.

DIXON, P. B.; RIMMER, M. T. **Forecasting and policy analysis with a dynamic CGE model of Australia**. Melbourne: Monash University, June 1998. (Preliminary Working Paper, n. OP-90).

DOMINGUES, E. P. **Dimensão regional e setorial da integração brasileira na área de livre comércio das Américas**. 2002. 228 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

EPE – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano nacional de energia 2030**. Brasília: EPE, 2007.

_____. **Balço energético nacional 2010** – ano-base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 53 p.

FEIJÓ, F. T.; PORTO JUNIOR, S. O protocolo de Quioto e o bem-estar econômico no Brasil: uma análise utilizando equilíbrio geral computável. **Análise Econômica (UFRGS)**, v. 51, p. 127-154, mar. 2009.

GUILHOTO, J. J.; LOPES, R.; MOTTA, R. S. **Impactos ambientais e regionais de cenários de crescimento da economia brasileira – 2002-2012**. Rio de Janeiro: Ipea, jul. 2002. (Texto para Discussão, n. 892).

GURGEL, A. C. Impactos da economia mundial de baixo carbono sobre o Brasil. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 40., 2012, Porto de Galinhas, Pernambuco. **Anais...** Porto de Galinhas: Anpec, 2012.

GURGEL, A. C.; PALTSEV, S. Costs of reducing GHG emissions in Brazil. **Climate Policy**, v. 14, n. 2, p. 209-223, 2014.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO₂ no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, v. 16, n. 1, p. 49-99, jan.-abr. 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de Contas Nacionais 2004-2005**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007a. Disponível em: <<https://bit.ly/3BM1kQc>>. Acesso em: 29 de out. 2015.

_____. **Pesquisa de orçamentos familiares 2002-2003**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007b. Disponível em: <<https://bit.ly/3QQtpKz>>. Acesso em: 29 out. 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, Mar. 2014.

- JOHANSEN, L. (Ed.). **A multi-sectoral study of economic growth**. Second Enlarged Edition. Amsterdam: North Holland Publishing, 1960. 274 p.
- JORGENSEN, D. W.; WILCOXEN, P. Reducing US carbon dioxide emissions: an assessment of different instruments. **Journal of Policy Modeling**, v. 15 n. 5-6, p. 491-520, Oct.-Dec. 1993.
- KNETSCH, J. L.; SINDEN, J. A. Willingness to pay and compensation demanded: experimental evidence of an unexpected disparity in measures of value. **Quarterly Journal of Economics**, v. 99, n. 3, p. 507-521, Aug. 1984.
- LOPES, R. L. **Efeitos de uma restrição na emissão de CO2 na economia brasileira**. 2003. 182 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- MAGALHÃES, A. S. **Economia de baixo carbono no Brasil**: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa. 2013. 290 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- MANNE, A. S. General equilibrium modeling for global climate change. *In*: KEHOE, T. J.; SRINIVASAN, T. N.; WHALLEY, J. (Ed.). **Frontiers in applied general equilibrium modeling**. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 255-276.
- MANNE, A. S; RICHELIS, R. Global CO₂ emissions reductions: the impacts of rising energy costs. **Energy Journal**, v. 12, n. 1, p. 87-107, 1991.
- MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. (Ed.). **Economia da mudança do clima no Brasil**: custos e oportunidades. São Paulo: Ibep Gráfica, 2010. 82 p.
- NORDHAUS, W. D. (Ed.). **A question of balance**: weighing the options on global warming policies. New Haven: Yale University Press, 2008.
- PIGOU, A. C. (Ed.). **The economics of welfare**. London: Macmillan, 1920.
- ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003. 196 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, jan. 2003.
- ROSE, A. (Ed.). **The economics of climate change policy**: international, national and regional mitigation strategies. Cheltenham: Edward Elgar, 2009.
- SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. (Ed.). **Applying general equilibrium**. Cambridge: Cambridge University Press, May 1992.

SILVA, J. G.; GURGEL, A. C. Impactos econômicos de cenários de políticas climáticas para o Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 42, n. 1, p. 93-136, abr. 2012.

SPRINGER, U. The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies. **Energy Economics**, v. 25, n. 5, p. 527-551, Sept. 2003.

STERN, N. (Ed.). **The economics of climate change: the Stern review**. Cambridge: Cambridge University Press. 2007.

TOURINHO, O. A. F.; MOTTA, R. S.; ALVES, Y. L. B. **Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral**. Rio de Janeiro: Ipea, ago. 2003. (Texto para Discussão, n. 976).

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Intended Nationally Determined Contributions (INDCs)**. Bonn: UNFCCC, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/3qJTyzT>>. Acesso em: 29 out. 2015.

VIGUIER L. L.; BABIKER, M. H.; REILLY, J. M. The costs of the Kyoto Protocol in the European Union. **Energy Policy**, v. 31, n. 5, p. 459-481, Apr. 2003.

WEYANT, J. P. Costs of reducing global carbon emissions. **Journal of Economics Perspectives**, v. 7, n. 4, p. 27-46, 1993.

WING, I. S. **Computable general equilibrium models and their use in economy-wide policy analysis**. Cambridge: MIT Press, Sept. 2004. (Technical Note, n. 6).

XIE, J.; SALTZMAN, S. Environmental policy analysis: an environmental computable general-equilibrium approach for developing countries. **Journal of Policy Modeling**, v. 22, n. 4, p. 453-489, July 2000.

APÊNDICE A

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Na implementação do modelo, uma série de parâmetros comportamentais são utilizados. Alguns são baseados em estimativas econométricas e a outros são atribuídos valores com base em conhecimentos econômicos e suposições. Pode não ser válida a alegação de que todos os parâmetros utilizados no modelo refletem a realidade. Essa dependência de estimativas para determinar os valores de elasticidade no processo de calibração do modelo é um tópico muito questionado, principalmente por aqueles que não utilizam a metodologia.

Desse modo, a análise de sensibilidade dos parâmetros se tornou uma questão primordial na utilização de modelos de equilíbrio geral computável (EGC). Como o foco deste trabalho são políticas de baixo carbono, foi dada uma atenção especial a parâmetros considerados chaves, especificamente às elasticidades de substituição energética e tecnológica, utilizadas nas estruturas de produção dos setores estruturados por compostos energéticos e nos setores com vetores tecnológicos, respectivamente, além dos parâmetros utilizados no mecanismo de dinâmica recursiva.

A análise de sensibilidade sistemática empregada neste trabalho segue a metodologia de quadratura gaussiana proposta por DeVuyst e Preckel (1997). Nessa abordagem, o modelo EGC é tratado como um problema de integração numérica no qual a solução do modelo (resultado das variáveis endógenas) pode ser obtida simultaneamente, além de seus dois primeiros momentos (média e variância), dada uma distribuição das variáveis exógenas (parâmetros ou choques). Assim, as estimativas de média, desvio-padrão e intervalos de confiança para os resultados do modelo podem ser obtidas. Essas informações representam dados qualitativos a respeito da sensibilidade dos resultados do modelo a parâmetros específicos, e podem sugerir os elementos para onde a atenção do pesquisador deve estar focada.

Dadas as considerações anteriores, a análise de sensibilidade sistemática consistiu em testar a robustez das elasticidades de substituição energética (ESUBREN, ESUBNREN, ESUBAUTO, ESUBENER, SIGMA3COM), tecnológica (ESUBTB) e os parâmetros necessários para o módulo de dinâmica recursiva (Alpha e Elastwage) calibrados conforme descrito na seção 3. O teste de sensibilidade estabeleceu um intervalo de 50% para esses parâmetros, com distribuição uniforme. Dado o número de simulações, cenários e parâmetros, períodos simulados (vinte anos) e grande número de resultados, demais resultados podem ser disponibilizados mediante solicitação.

Os testes de sensibilidade mostraram que os resultados agregados (produto interno bruto – PIB, investimento, consumo etc.) para todas as elasticidades são robustos, se mostrando muito pouco sensíveis à variação das elasticidades supracitadas. Nos anos iniciais, os resultados são muito robustos, aumentando levemente o coeficiente de variação – medido pela divisão da média pelo desvio-padrão – apenas no fim do período simulado, para a elasticidade do investimento (Alpha), notadamente para os resultados de exportações e importações.

Quanto aos impactos setoriais, os resultados de alguns setores se mostraram sensíveis à parametrização. No caso da elasticidade do investimento (Alpha), cinco setores se mostraram sensíveis. São eles, i) automóveis e utilitários; ii) água, esgoto e limpeza urbana; iii) serviços de manutenção e reparo; iv) transmissão e distribuição de energia elétrica; e v) indústrias diversas. Outros dois setores apresentaram sensibilidade moderada: artigos do vestuário e máquinas elétricas. Em contrapartida, nenhum resultado setorial foi sensível às demais elasticidades (ESUBREN, ESUBNREN, ESUBAUTO, ESUBENER, SIGMA3COM), mostrando robustez nos resultados.

Investigando os resultados referentes aos setores estruturados por vetores tecnológicos, no entanto, percebe-se que algumas tecnologias foram sensíveis à elasticidade de substituição CRESH para as tecnologias. Os resultados mostraram-se sensíveis para a tecnologia de hidroeletricidade e, mais levemente, para a energia eólica, acarretando em uma menor robustez do resultado para o setor de geração de eletricidade. Dadas tais sensibilidades, é importante ter cautela com os resultados encontrados para este setor. A análise de sensibilidade mostra que a especificação de vetores tecnológicos deste setor merece futuras investigações.

Desse modo, como para os resultados para as emissões por fontes, os efeitos sobre as famílias (consumo e utilidade) são robustos para todas as elasticidades analisadas.

REFERÊNCIA

DEVUYST, E. A.; PRECKEL, P. V. Sensitivity analysis revisited: a quadrature-based approach. **Journal of Policy Modelling**, v. 19, n. 2, p. 175-185, Apr. 1997.

Originais submetidos em: ago. 2016.

Última versão recebida em: fev. 2021.

Aprovada em: maio 2022.