

CENÁRIOS DE EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS IMPACTOS SOBRE O USO DA TERRA NO BRASIL: EXERCÍCIOS A PARTIR DE UM MODELO DE EQUILÍBRIO GERAL COMPUTÁVEL¹

Autor(es): Gêssica Cardoso Pereira de Souza²; Ângelo Costa Gurgel³

Filiação: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

E-mail: gessicacps@yahoo.com.br; angelo.gurgel@fgv.br

RESUMO: O Brasil é considerado um líder mundial na produção de etanol derivado da cana-de-açúcar. Questiona-se se existe disponibilidade de terra agricultável que possa abrigar a expansão da cultura da cana-de-açúcar, sem causar maiores prejuízos para o meio ambiente e para a sociedade. Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa foi investigar o impacto do aumento na produção de cana-de-açúcar, sobre o uso da terra no Brasil. A metodologia utilizada foi a de equilíbrio geral, com modificações na modelagem para tornar a análise factível. Os resultados indicaram que um aumento da oferta de cana-de-açúcar provoca uma expansão das áreas das demais culturas em todo o Brasil; diminui as pastagens na maioria das regiões; e agrava o desmatamento, principalmente na região Norte do país.

Palavras-Chave: Cana-de-açúcar; Uso da terra; Equilíbrio Geral Computável

ABSTRACT: Brazil is considered a world leader in the production of ethanol derived from sugarcane. Is questioned if there is availability of agricultural land that allows an expansion of the sugarcane crop, without causing greater damage to the environment and to society. Thus, the main objective of this research is to investigate the impact of increased sugarcane production on land use in Brazil. A methodology used for general equilibrium, with modeling modifications to make a feasible analysis. The results indicate that the increase in the supply of sugarcane causes an expansion of crop areas throughout Brazil; Decreases as pastures in most regions; It worsens deforestation, especially in the northern region of the country.

Keywords: Sugarcane; Land use; General Computable Equilibrium

JEL: C68; Q24; R13

1 INTRODUÇÃO

São diversos os fatores que desencadeiam o recente aumento de interesse pela produção de biocombustíveis. Dentre eles, vale destacar a instabilidade do preço do barril de petróleo e o interesse global em adotar fontes de energia limpa, a fim de reduzir as emissões de gases do efeito estufa no setor de transporte. O Brasil é considerado um líder mundial na produção de

¹ Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro para apresentação do trabalho.

² Doutoranda do programa de pós graduação em economia aplicada do Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional (CEDEPLAR), Faculdade de Ciências Econômicas da UFMG.

³ Doutor em Economia Aplicada e Professor Adjunto da FGV-EESP.

etanol de cana, cuja indústria possui um dos menores custos de produção do mundo. Somente na região centro-sul do país, a produção de etanol chegou a 28,2 bilhões de litros, na safra de 2015/2016, contra 4,6 bilhões de litros na safra 1982/1983. Acompanhando a evolução do setor, está a produção canavieira nas últimas décadas. Na safra de 2015/2016, a produção chegou a 666 milhões de toneladas ⁴. O crescimento da produção vem acompanhado de uma forte expansão da área colhida de cana. No período entre 2000 e 2015, o território brasileiro apresentou uma expansão de 126% de área destinada ao cultivo da commodity.

A rápida expansão da área reservada à produção de cana-de-açúcar provoca alguns questionamentos e preocupações acerca dos impactos socioambientais e econômicos. Uma questão que vêm sendo amplamente discutidas na literatura é quanto a disponibilidade de terra agricultável que possa abrigar a expansão da cultura da cana-de-açúcar. Por ser uma atividade intensiva no uso da terra, as ameaças, diretas e indiretas, sobre o uso do solo, podem gerar consequências ambientais graves por meio da diminuição de áreas florestais, por exemplo. Ou, ainda, gerar consequências para a população economicamente vulnerável, por meio do aumento dos preços dos alimentos, (FAO, 2013). Isto pode acontecer se a expansão da cana-de-açúcar ocorrer sobre as plantações de culturas alimentares, diminuindo a produção nos setores de insumos alimentares, ou até mesmo, a oferta final de alimento.

Subjacente à essa discussão, encontra-se a questão dos efeitos diretos e indiretos das mudanças dos usos do solo (Gazzoni, 2013). A *Direct Land Use Change* (LUC) acontece sempre que a cobertura de determinada área é convertida em outra. Um exemplo disso é quando os hectares destinados à produção de uma cultura qualquer, como a soja, são utilizados na produção de outra, como a cana-de-açúcar. Ou, ainda, quando a expansão de uma cultura, como a cana-de-açúcar, invade áreas que originalmente não são destinadas a plantações, como as áreas de pasto. Já a *Indirect Land Use Change* (ILUC) é um efeito de segunda ordem, pois ocorre quando a mudança de uso em uma região causa mudança de uso em outra. Uma ilustração disso é quando se diminui a produção de soja em uma região, em detrimento de um aumento do cultivo de cana-de-açúcar, o que induz à produção de soja em outra região. Ou, ainda, quando a própria pastagem se desloca em direção às áreas de floresta, em detrimento de uma expansão das culturas sobre as pastagens.

Lapola *et al*, (2010) consideram que a expansão planejada de biocombustíveis no Brasil pode causar significativas mudanças, diretas e indiretas, no uso da terra. Um aumento na produção de etanol derivado da cana, entre 2003 a 2020, seria responsável por 41% do desmatamento indireto, e o aumento da produção de diesel da soja por 59%. Ocorreria a expansão de 121.970 km² de pastagens em áreas florestais, e 46.000 km² em outros habitat nativos. Ferreira Filho & Horridge (2014), ao analisarem os efeitos da expansão da produção de etanol sobre o ILUC, concluíram que, no Brasil, para um crescimento projetado até 2020, seria necessário expandir somente 0,75% de áreas cultiváveis, com quedas nas áreas de pastagens de 0,21% e de terras florestais de 0,65%. Portanto, os efeitos ILUC da expansão do etanol seriam muito pequenos. Ademais, a produção de etanol não desencadearia aumentos dos preços dos alimentos, uma vez que a quantidade de novas terras necessárias para a expansão é pequena.

Observa-se, portanto, uma controvérsia, em relação a intensidade do LUC e ILUC proveniente da expansão dos insumos energéticos. Encontram-se na literatura diferentes resultados e conclusões, que variam de acordo com a estratégia de modelagem utilizada; o tipo de biocombustível considerado; os cenários simulados; os pressupostos; dentre outros aspectos. Em geral, as diferenças mais fortes nos resultados estão relacionadas às diferenças

⁴ Site <http://www.unicadata.com.br/>

nos custos de expansão da terra, às respostas de produtividade endógena e aos pressupostos sobre as terras cultiváveis, (SCHMITZ *et al*, 2014). Três questões principais surgem quando se analisa conjuntamente o uso do solo e a produção de biocombustíveis. A disponibilidade de terra realmente é uma restrição ao desenvolvimento dos biocombustíveis? Até que ponto a expansão dos biocombustíveis é a causa da abertura de novas terras agrícolas e da conversão entre os diferentes usos do solo? Por fim, até que ponto as mudanças, diretas e ou indiretas, do uso do solo poderiam estar relacionadas com a redução da produção de alimento e o consequente aumento de preços destes?

Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa é investigar o impacto, sobre o uso da terra, de um aumento na produção do etanol derivado da cana-de-açúcar no Brasil. Para alcançar esse objetivo, foi utilizado como metodologia, o Projeto de Análise de Equilíbrio Geral (PAEG), com alguns aprimoramentos necessários para tornar a análise factível. Uma das modificações no modelo foi a incorporação de um módulo de uso da terra capaz de captar o LUC e o ILUC. Um custo de conversão entre diferentes tipos de solos foi abordado explicitamente, considerando a ideia de escassez de terra ricardiana. Por meio da função de custo de conversão, espera-se que os parâmetros variem de acordo com cada macrorregião, levando em consideração a heterogeneidade da terra. A compreensão das dinâmicas que envolvem a substituição de produtos agrícolas e a conversão da terra em seus diferentes usos, tanto direta quanto indiretamente, auxiliam os formuladores de políticas públicas em decisões que envolvam tanto questões econômicas quanto ambientais.

2 METODOLOGIA

2.1 MODELO APLICADO DE EQUILÍBRIO GERAL – PAEG

O modelo econômico que será utilizado é o Projeto de Análise de Equilíbrio Geral (PAEG). Esse tipo de modelagem se mostra adequado para responder aos problemas da pesquisa em questão, uma vez que aquele é capaz de representar as economias das grandes regiões brasileiras e países parceiros, considerando as inter-relações dos diversos setores, mercados e agentes das economias. Além disso, essa modelagem permite obter a variação total no nível de atividade econômica em resposta a choques de produção. O modelo PAEG é estático, multirregional e multissetorial. As cinco macrorregiões brasileiras são representadas individualmente o que permite capturar as especificidades relacionadas à produção de cana-de-açúcar, dos demais produtos agropecuários e da área de vegetação natural disponível para conversão, possibilitando examinar os efeitos diretos e indiretos gerados por um aumento de oferta e demanda da cana-de-açúcar.

O modelo de referência do PAEG é o modelo *Global Trade Analysis Project - GTAP* (HERTEL, 1997; GTAP, 2001). A programação do modelo PAEG segue a estrutura básica do modelo *GTAPinGAMS* (Rutherford e Paltsev, 2000; Rutherford, 2005), que utiliza a base de dados do modelo GTAP, mas é elaborado como um problema de complementaridade não-linear, em linguagem de programação GAMS (*General Algebraic Modeling System*, Brooke *et al.*, 1998). Portanto, o PAEG segue a "tradição" Americana de modelagem. Além de permitir que o modelo seja resolvido como um problema de complementaridade não-linear, a versão do GTAP em GAMS também permite a agregação da base de dados em diferentes formatos e tamanhos e a modificação ou imposição de dados alternativos nas economias domésticas.

O modelo PAEG 4.0 utiliza a base de dados 9.0 do GTAP, representando o ambiente econômico de 2011, composto de dados de 140 regiões do mundo e 57 bens/setores

produtivos. Setores e regiões são agregados de acordo com os objetivos da pesquisa, de modo a concentrar a representação econômica naquelas regiões e setores de interesse, e evitar problemas computacionais relacionados à dimensão do modelo. No presente estudo, a priori, será mantida a agregação original do PAEG. Para representar as cinco macrorregiões do Brasil, os dados do GTAP para a região brasileira foram substituídos pelos dados das matrizes de insumo-produto das cinco macrorregiões.

No PAEG, cada região é representada por uma estrutura de demanda final, composta por despesas públicas e privadas, com bens e serviços. O modelo baseia-se no comportamento otimizador dos agentes. Os consumidores buscam a maximização do seu bem estar, ficando sujeitos à restrição orçamentária, pois consideram fixos os níveis de investimento que se igualam à poupança e as transferências líquidas internacionais de renda. Os setores produtivos combinam insumos intermediários e fatores primários de produção (capital, trabalho qualificado, trabalho não qualificado, terra e recursos naturais), com o objetivo de minimizar os custos, dada a tecnologia disponível. A base de dados inclui os fluxos bilaterais de comércio entre países e regiões, bem como os custos de transporte, tarifas de importação e impostos (ou subsídios) às exportações (GURGEL *et al.*, 2014).

A produção doméstica (vom_{ir}) é distribuída entre exportações ($vxml_{irs}$), serviços de transporte internacional (vst_{ir}), demanda intermediária ($vdfm_{ijr}$), consumo privado ($vdpm_{ir}$), investimento ($vdim_{ir}$) e consumo do governo ($vdgm_{ir}$). A identidade contábil na base de dados, representada pelas matrizes de contabilidade social, referente à produção doméstica, é apresentada pela equação abaixo:

$$vom_{ir} = \sum_s vxml_{irs} + vst_{ir} + \sum_j vdfm_{ijr} + vdpm_{ir} + vdgm_{ir} + vdim_{ir} \quad (1)$$

Bens importados, representados agregadamente por vim_{ir} , são utilizados no consumo intermediário ($vifm_{ijr}$), no consumo privado ($vipm_{ir}$) e no consumo do governo ($vigm_{ir}$). A identidade contábil desses fluxos é representada abaixo:

$$vim_{ir} = \sum_j vifm_{ijr} + vipm_{ir} + vigm_{ir} \quad (2)$$

Na produção de Y_{ir} incluem-se insumos intermediários (domésticos e importados) e fatores de produção móveis (vfm_{fir} , $f \in m$). A renda dos fatores de produção é distribuída ao agente representativo. O equilíbrio nos mercados de fatores é dado por uma identidade que relaciona o valor do pagamento dos fatores com a renda destes:

$$\sum_i vfm_{fir} = evom_{fr} \quad (3)$$

As condições de equilíbrio entre oferta e demanda dos mercados são dadas abaixo. Nos mercados internacionais, as exportações do bem i pela região r (vxm_{ir}) precisam ser iguais às importações do mesmo bem, por todos os parceiros comerciais ($vxml_{irs}$), conforme representado na relação:

$$vxm_{ir} = \sum_s vxml_{irs} \quad (4)$$

Da mesma forma, condições de equilíbrio aplicam-se também aos serviços de transporte internacionais. A oferta agregada ao serviço de transporte j , vt_j , deve ser igual ao valor dos serviços de transporte para exportações oferecido por cada região r :

$$vt_j = \sum_r vst_{jr} \quad (5)$$

Além disso, o equilíbrio entre oferta e demanda, no mercado de serviços de transporte, iguala a oferta desses serviços à soma dos fluxos bilaterais de serviços de transporte adquiridos nas importações de bens ($vtwr_{jisr}$), como na equação abaixo:

$$vt_j = \sum_r vtwr_{jisr} \quad (6)$$

As receitas dos impostos e transferências, indicadas pela linha pontilhada, são representadas pela letra R . Os fluxos de impostos consistem em impostos indiretos na produção e exportação (R_{ir}^Y), no consumo (R_r^C), na demanda do governo (R_r^G) e nas importações (R_{ir}^M). A renda do governo também inclui impostos diretos ao agente representativo, representados por R_r^{HH} , bem como transferências do exterior, vb_r . A restrição orçamentária do governo segue a seguinte representação:

$$vgm_r = \sum_i R_{ir}^Y + R_r^C + R_r^G + \sum_i R_{ir}^M + R_r^{HH} + vb_r \quad (7)$$

A restrição orçamentária do agente representativo relaciona a renda dos fatores de produção, descontada dos pagamentos de impostos, às despesas de consumo e investimento privado, como na relação abaixo:

$$\sum_f evom_{fr} - R_r^{HH} = vpm_r + vim_r \quad (8)$$

O equilíbrio de mercado (oferta igual à demanda, para todos os bens e fatores de produção) e o balanço da renda (renda líquida igual à despesa líquida) são condições para a consistência da base de dados das matrizes de insumo-produto e contabilidade social, e podem ser visualizadas nas equações anteriores. Ademais, as identidades que garantem os lucros econômicos iguais a zero são mantidas no modelo. Tanto no PAEG quanto no GTAP, consideram-se competição perfeita e retornos constantes à escala, de forma que os custos com insumos intermediários e fatores de produção se igualam ao valor da produção, e os lucros econômicos, a zero. Tal condição se aplica a cada um dos setores produtivos e atividades, conforme as equações (13) a (19), a seguir.

$$Y_{ir}: \sum_f vfm_{fir} + \sum_j (vifm_{jir} + vdfm_{jir}) + R_{ir}^Y = vom_{ir} \quad (9)$$

$$M_{ir}: \sum_s (vxmd_{isr} + \sum_j vtwr_{jisr}) + R_{ir}^M = vim_{ir} \quad (10)$$

$$C_r: \sum_i (vdpm_{ir} + vipm_{ir}) + R_{ir}^C = vpm_r \quad (11)$$

$$G_r: \sum_i (vdgm_{ir} + vigm_{ir}) + R_{ir}^G = vgm_r \quad (12)$$

$$I_r: \sum_i vdim_{ir} = vim_r \quad (13)$$

$$FT_{fr}: evom_{fr} = \sum_i vfm_{fir} \quad f \in S \quad (14)$$

$$YT_j: \sum_i vst_{jr} = vt_j = \sum_i vtwr_{jirs} \quad (15)$$

As relações apresentadas mostram as identidades econômicas do modelo PAEG. A longo prazo, o preço de produção se iguala ao custo marginal, à medida em que novas firmas entram no mercado. A equação 10 equilibra importação total do bem i pela região r , com os gastos associados às importações bilaterais do bem i com origem nas demais, considerando, ainda, seus custos de transportes. A equação 11 representa os gastos das famílias com bens importados, domésticos e impostos, que se igualam à renda líquida. Poupança é considerada exógena e igualada a investimentos.

Para entender o funcionamento do modelo, é preciso descrever como os agentes e setores se comportam. A função de produção que representa a minimização do produtor é uma função de elasticidade de substituição constante (CES) em que fatores primários de produção (componentes do valor adicionado) podem ser substituídos. A árvore tecnológica da estrutura produtiva do PAEG segue na Figura 1. Os insumos intermediários e os fatores primários de produção são combinados a partir de uma função Leontief, não aceitando substitutibilidade entre eles. Cada insumo intermediário, nessa função Leontief, é uma combinação entre uma parcela doméstica e uma importada do mesmo bem, a partir de uma função CES, de elasticidade de substituição, representada pelo parâmetro $esubd(i)$. Portanto, os produtores adquirem cestas de insumos intermediários, sobre as quais decidem entre bens domésticos e importados, por meio da elasticidade de substituição ($esubd(i)$). O produto final, representado por $y(i,r)$, recebe o preço $py(i,r)$. Como não há desemprego no modelo, os preços dos fatores de produção são considerados flexíveis ($pf(mf,r)$), a não ser que os fatores possuam mobilidade limitada, como é o caso da terra, preço representado por $ps(sf,j,r)$.

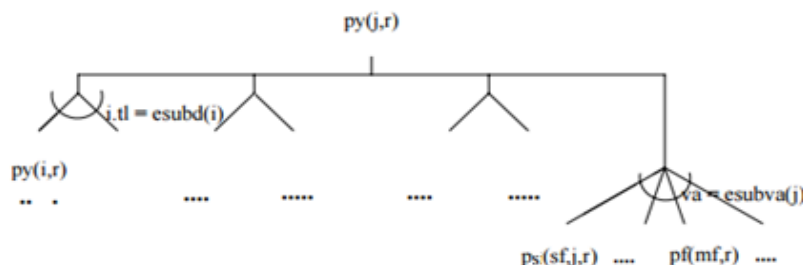


Figura 1: Árvore tecnológica da estrutura produtiva do PAEG

Fonte: Gurgel et al. (2013)

No modelo PAEG original, inicialmente, apenas o capital e o trabalho são considerados fatores primários de produção. A escolha entre importações de diferentes parceiros comerciais é baseada na pressuposição de Armington, ou seja, considera-se que um bem importado de uma região é um substituto imperfeito do mesmo bem, com origem em outras regiões. A demanda final no modelo é caracterizada por uma função Cobb-Douglas, com agregação de bens domésticos e importados. A demanda, investimentos e fluxos de capitais são mantidos fixos, bem como o saldo do balanço de pagamentos. Dessa forma, mudanças na taxa real de câmbio devem ocorrer para acomodar alterações nos fluxos de exportações e importações após os choques.

O consumo da administração pública é representado, no modelo, por meio de uma função Leontief, agregando bens compostos de parcelas domésticas e importadas. Os diferentes bens compostos não são substituíveis entre si, contudo, componentes domésticos e importados de cada bem respondem a preços e são substituíveis, de acordo com a elasticidade de substituição. O consumo do governo poderá alterar por mudanças nos preços dos bens, assim como pela receita advinda dos impostos, que estará sujeita a mudanças no nível de atividade e no de consumo. Além desses diversos processos de otimização, o modelo considera as condições de equilíbrio entre oferta e demanda, nos mercados; lucro zero; e equilíbrio entre renda e despesas, dos agentes, para completar o processo de equilíbrio computacional.

Como descrito acima, o modelo PAEG adota, como fatores primários de produção, somente o capital e o trabalho, pois o fator terra está agregado ao fator capital. Portanto, o modelo original não consegue captar a competição entre usos produtivos da terra, tampouco entre terras naturais e terras produtivas. Dessa forma, foi feita a desagregação da renda da

terra agrícola e natural da renda do capital no modelo, e foram implementadas especificações que permitam associar, explicitamente, um custo de conversão entre as áreas produtivas e não produtivas.

2.2 MODIFICAÇÕES DO MODELO ORIGINAL

Para responder ao problema de pesquisa proposto é necessário representar explicitamente a possibilidade de competição pelo uso da terra agrícola por diferentes culturas, bem como a capacidade da expansão da fronteira agrícola. O primeiro passo no processo de endogenização da terra é desagregar a renda da terra agrícola e natural da renda do capital na Matriz de Insumo Produto, utilizada no PAEG. O segundo passo é procurar representar a oferta e demanda de terra e, explicitamente, o custo de transformação de áreas naturais em áreas agropecuárias, no arcabouço de equilíbrio geral.

Para a desagregação da renda da terra agrícola foi calculada a remuneração da terra agrícola para todas as regiões brasileiras. Posteriormente, foi encontrada a proporção dessa renda da terra proveniente do Valor da Produção agropecuário. Uma forma de calcular a renda da terra é por meio da determinação do valor do aluguel da mesma. O aluguel da terra pode ser considerado o pagamento recebido pelo proprietário de terra em um processo de arrendamento. Os dados sobre as terras arrendadas foram retirados do Censo Agropecuário de 2006, em “Despesas realizadas pelos estabelecimentos – Arrendamento de terras” e “Condição legal das terras”.

O cálculo da remuneração da terra natural se baseou na série dos preços de terras coletados pela FGV/IBRE e nos hectares de terras naturais disponíveis para conversão. A partir dos dados da FGV/IBRE, deflacionados pelo índice IGP-DI, considerando como base o ano de 2006, foi calculada a proporção entre os preços de vendas de matas e campos e entre os preços de venda das lavouras e pastagens, a fim de estabelecer uma relação entre os preços de terras agrícolas e naturais. Posteriormente, essas médias de preço foram extrapoladas para as regiões de terras naturais passíveis de conversão. Dessa forma, obtém-se a renda da terra natural. Os valores encontrados para a proporção entre os preços de terras agrícola e natural, renda da terra agrícola e natural seguem na Tabela 1.

Tabela 1: Valores das rendas da terra agrícola e natural

Brasil e macroregiões	Proporção entre os preços de terras agrícola e natural	Renda da terra agrícola (R\$/ha)	Renda da terra natural (R\$/ha)
Norte	0.362	50.62	18.34
Nordeste	0.544	107.28	58.39
Sudeste	0.630	300.64	189.50
Centro-Oeste	0.546	121.40	66.34
Sul	0.638	215.97	137.71
Brasil	0.411	214.15	87.939

Fonte: Resultados da pesquisa

A representação da demanda e oferta das terras produtivas e de vegetação natural foram incorporadas ao modelo PAEG, seguindo, em linhas gerais, o procedimento adotado por Gurgel *et al.* (2008), com algumas adaptações. E o processo de conversão é representado pelos custos crescente de conversão das terras, de acordo com a formulação de Gouel & Hertel (2006). As terras produtivas precisam ter funções de oferta e demanda bem definidas, vista a necessidade de fechar as transações em economias em equilíbrio geral. Os setores produtivos agropecuários demandam o fator terra, combinando-o com capital, trabalho e

insumos intermediários. Nas funções de produção de cada bem agrícola do modelo PAEG, tem-se a demanda por terra.

Do lado da oferta, será utilizada uma função CES, representando a substituição entre terra natural e terra agrícola (lavouras, pastagens, silvicultura e florestas), com posterior desagregação das diferentes lavouras em outra função CET (a mesma representação é utilizada nos modelos GTAP, GTAPinGAMS, GTAP-AEZ, TERM, BLUE, REGIA, dentre outros citados nesse trabalho). Segue abaixo, na Figura 2, a representação do lado da oferta das terras agropecuárias adotada no modelo PAEG.. As terras podem ser utilizadas no cultivo de culturas e pastagens, representadas por L_i , L_j e L_n .

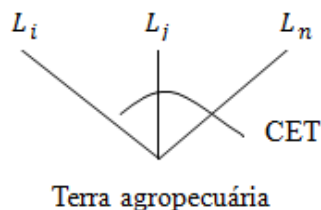


Figura 2: Estrutura da terra incorporada ao modelo PAEG
Fonte: elaboração própria

O montante de terra agropecuária, em unidades físicas, alocado para cada setor da agropecuária, foi definido pela distribuição inicial do valor da terra utilizada por cada setor no GTAP (modelo referencia do PAEG), uma vez que consideramos que o preço relativo inicial da terra agropecuária é o mesmo em todos os setores. Então, a área física específica de cada tipo de produto agropecuário, resultante do modelo, pode ser interpretada como "área equivalente", considerando diferenciais de produtividade. Dessa forma, o modelo produz variações relativas, físicas, considerando o potencial produtivo por área de cada cultura após o choque.

A Figura 3 representa a estrutura da função de transformação da terra, incorporada ao modelo PAEG. Uma função CES pode transformar um hectare de terra, de um tipo qualquer, em um hectare de outro tipo, ou, ainda, transformar área natural em área agrícola, usando insumos de produção. Os insumos são: área natural ("fator fixo"), capital, trabalho e insumos intermediários, e o produto é a área agrícola. A área natural é um insumo usado em proporção constante aos demais. A substituição entre esses insumos é especificada por uma função Cobb-Douglas. O processo de conversão é representado pela função de custo de conversão da terra que será detalhada adiante. Esse custo de conversão nada mais é que a soma dos gastos com os insumos utilizados na conversão. A elasticidade entre o "fator fixo" e os demais insumos visa captar a curvatura da curva de custo de conversão. Procedimento semelhante é encontrado em Gurgel *et al*, (2008), Gurgel *et al*, (2011), Gurgel *et al*, (2016).

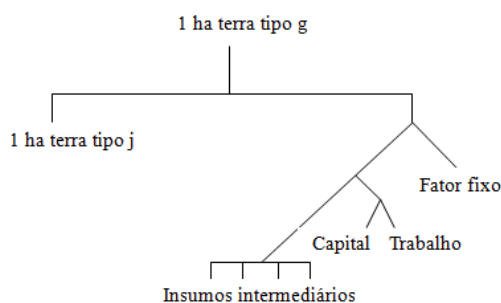


Figura 3: Estrutura da função de transformação da terra

O cálculo do custo de conversão das cinco macrorregiões brasileiras foi baseado em Gouel & Hertel (2006). O primeiro passo foi o levantamento dos hectares de terras em seus diferentes usos, incluindo as terras com potencial de conversão e o levantamento dos hectares de terras desmatadas. O segundo passo foi o levantamento dos preços médios de terras agrícolas e naturais. A hipótese é de que, no período inicial, o primeiro hectare de terra desmatado, dentre aqueles hectares de terras passíveis a conversão, gerará um custo de conversão igual ao preço da terra natural naquele período inicial. Essa hipótese é útil para fins de calibração, uma vez que implica igualdade entre preço da terra natural (variável observada) e custo de conversão (variável não observada), e que é condizente com a condição de lucro zero necessária para representar o equilíbrio setorial em um modelo de equilíbrio geral.

De acordo com Gouel & Hertel (2006), o preço da terra natural é determinado pelo valor presente líquido (VPL) do fluxo de rendimentos esperados da terra natural. Dessa forma, o VPL dos rendimentos futuros pode ser expresso da seguinte forma:

$$PTnat_t^i = RTnat_t^i \frac{1+ROR_t^i}{ROR_t^i} \quad (16)$$

Onde $PTnat_t^i$ é o preço médio de um hectare de terra natural na região i , no período t ; $RTnat_t^i$ é a renda da terra por hectare e ROR_t^i é a taxa esperada líquida de retorno na região onde o desmatamento está acontecendo.

Se considerarmos que a terra desmatada trará benefícios no período futuro, da mesma forma que um ativo de investimento, o custo de conversão, então, não será igual ao preço da terra natural, mas será o valor presente do preço da terra natural, no próximo período. O custo de conversão CC_t^i será dado por:

$$CC_t^i = \frac{PTnat_{t+1}^i}{1+ROR_t^i} \quad (17)$$

Considerando que as expectativas são estáticas, temos:

$$CC_t^i = \frac{PTnat_t^i}{1+ROR_t^i} \quad (18)$$

Fazendo as devidas substituições:

$$CC_t^i = \frac{RTnat_t^i}{ROR_t^i} \quad (19)$$

A Tabela 2, abaixo, apresenta os valores da renda da terra natural, a taxa de retorno e o custo de conversão de novas áreas. A taxa de retorno foi calculada de acordo com a equação 25, utilizando o preço médio da terra natural e a renda da terra natural. A média de preço da terra natural, por região, foi determinada por meio dos dados da série de preços de venda das terras de mata e campo, de 1977 a 2006, coletados pela FGV/IBRE e deflacionados pelo índice IGP-DI, considerando como base o ano de 2006. O custo de conversão foi calculado utilizando a equação 19, que envolve simplesmente a divisão entre as rendas de terra e as taxas de retorno. O cálculo do custo de conversão para a região nordeste foi baseado apenas

nas informações dos Estados do Maranhão, Piauí e Bahia (MAPIBA), uma vez que os demais Estados não possuem grande capacidade de conversão.

Tabela 2: Custo de conversão da terra

Brasil e Macroregiões	RTnat (R\$/ha)	PTnat (R\$/ha)	ROR	CC (\$/ha)
Norte	18.34	388	0.05	369.46
Nordeste	58.39	657	0.10	598.75
Sudeste	189.50	1 810	0.12	1620.36
Centro-Oeste	66.34	1 389	0.05	1322.48
Sul	137.71	3 908	0.04	3770.22
Brasil	87.93	1 224	0.07	1136.34

Fonte: Resultados da pesquisa

Para o levantamento dos hectares de terras em seus diferentes usos e das terras passíveis à conversão, foram utilizados os dados do Mapeamento Sistemático do Uso da Terra do IBGE, empregados no projeto “Mudanças na Cobertura e Uso da Terra do Brasil”⁵. Foram extraídos dos arquivos vetoriais disponibilizados pela instituição as informações, em área, das 14 classes de cobertura e do uso da terra considerada na pesquisa, no ano de 2014. Para a pesquisa em questão, foram utilizadas 9 classes, compiladas de forma conveniente às necessidades da pesquisa, chegando a 5 classes de terras finais: terras agrícolas, pastagem natural, pastagem plantada, silvicultura e vegetação florestal.

Os mosaicos de uso da terra foram ponderados com as mesmas proporções adotadas pelo Climate Policy Initiative⁶. No “Mosaico de área agrícola com remanescentes florestais” foi atribuído um peso de 37,5% à vegetação nativa; 12,4% à agricultura e 50,1% à pastagem. No “Mosaico de vegetação Florestal com Atividade Agrícola”, 62,5% foi atribuído à vegetação florestal; 7,5% à agricultura e 30% à pastagem. Por fim, no “Mosaico de área agrícola com remanescentes campestres”, o peso da vegetação nativa foi de 37,5%; agricultura, 12,4% e pastagem, 50,1%. Portanto, a terra de pastagem plantada nada mais é que a soma da classe 2 com 50,1% da classe 3, 30% da classe 6 e 50,1% da classe 9. As terras agrícolas são a soma da classe 1 com 12,4% da classe 3, 7,5% da classe 6 e 12,4% da classe 9. Já as áreas de vegetação natural a serem implementadas no modelo e no cálculo dos parâmetros são obtidas pela soma da vegetação florestal (classe 5) com a pastagem natural (classe 8), vegetação campestre (classe 7), 37,5% da classe 3, 62,5% da classe 6 e 37,5% da classe 9.

Foram subtraídos dessas áreas naturais os hectares de terras destinados à conservação ambiental, chegando, enfim, nas áreas consideradas aptas à conversão. O art. 12 da Lei n. 12.651 estabelece que todo imóvel rural deve manter área com cobertura de vegetação nativa, a título de Reserva Legal, observado um percentual mínimo em relação à área do imóvel. Na Amazônia Legal, de 80% no imóvel situado em área de florestas, 35% no situado em área de cerrado e 20% no situado em área de campos gerais. Para os imóveis localizados nas demais regiões do País, o valor estipulado é de 20% (BRASIL, 2012). Dessa forma, levando em consideração a proporção de cada bioma, em cada Estado, foram considerados 80% de reserva legal na região norte, 35% no nordeste e centro-oeste e 20% na região sudeste e sul.

⁵ <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/default.shtm>

⁶ As ponderações foram gentilmente disponibilizadas pelo pesquisador e diretor executivo Juliano Assunção. Agradecemos a gentileza.

O levantamento das médias de desmatamento anual foi feito por meio dos dados disponibilizados pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBSO⁷. Os dados por bioma formam compilados, de forma a representar as médias de desmatamento por Estado e por macrorregiões. No entanto, na região nordeste, foram considerados os desmatamentos somente dos Estados da Bahia, Maranhão e Piauí, uma vez que o desmatamento atual dos demais Estados ocorre no bioma caatinga, em sua grande maioria em prol da produção de carvão vegetal, e não de produção agrícola ou pecuária. Os dados de desmatamento por região foram utilizados para calibrar o montante desmatado em um dado momento no modelo. O valor final das áreas de cada uso da terra incorporado no modelo, assim como o desmatamento anual, segue na Tabela 3.

Tabela 3: Áreas dos diferentes usos do solo (milhões de hectares)

Brasil e Macrorregião	Áreas agrícolas	Pastagem	Silvicultura	Reserva legal	Área apta a conversão	Média de desmatamento anual
Norte	4,5	38,4	0,3	257,9	64,4	0,7
Nordeste	10,3	27,7	0,8	7,7	14,3	0,4
Sudeste	16,7	32,3	3,7	7,1	28,6	0,1
Centro-Oeste	21,1	53,7	0,8	28,1	52,3	0,4
Sul	17,8	11,5	2,8	4,3	17,2	0,05
Brasil	73,9	173,0	8,6	307,7	181,4	1,8

Fonte: Elaboração própria, baseada nos dados do projeto “Mudanças na Cobertura e Uso da Terra do Brasil” – IBGE e Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite - MMA

O custo de conversão muda à medida que novas áreas são desmatadas. Como a função de custo de conversão é convexa, à medida que o desmatamento aumenta, o custo de conversão de um hectare adicional sobe. Tal implicação é condizente com a teoria ricardiana, de que as terras exploradas primeiro são aquelas com maior facilidade de acesso. Dessa forma, assumimos que os custos de conversão se tornam infinitos à medida que se aproximam do desmatamento do último hectare de terra disponível, o que significa que esse último hectare se torna economicamente inacessível. Várias formas funcionais podem representar tal situação. A escolhida para essa pesquisa foi a utilizada por Gouel & Hertel (2006) e Chakravorty *et al*, (2012):

$$CC_t^i = -\alpha \ln\left(\frac{\bar{h}-h}{\bar{h}}\right) + \beta \quad (20)$$

Onde \bar{h} é o total de terra disponível, ou seja, é o total de terras passíveis à conversão, incluindo a área já convertida e em uso. O h representa a área em uso atualmente. Note que $\bar{h} - h$ é a área disponível para conversão, passível a desmatamento. E que $\left(\frac{\bar{h}-h}{\bar{h}}\right)$ é limitado entre zero e um, de modo que o \ln é limitado entre $[-\infty, 0]$. Os parâmetros α e β são positivos no modelo e variam por região. O α é o parâmetro de inclinação e β é o parâmetro de nível, representando, implicitamente, o custo de conversão do primeiro hectare de terra desmatada, ou seja, representa, implicitamente, os custos de conversão quando $h = 0$. O parâmetro β irá nos dizer o ponto no qual essa função custo começa: se ela parte de um ponto mais alto ou mais baixo da curva, representando a heterogeneidade da terra em cada região. Ou seja, β está diretamente relacionado com as características da terra de cada região, (Gouel & Hertel, 2006).

⁷ Desenvolvido pelo Ministério do Meio Ambiente - SBF/MMA - http://siscom.ibama.gov.br/monitora_biomias/

O problema de calibração consiste em escolher α e β que combine as informações sobre o custo de conversão e a elasticidade do custo de conversão em relação à terra utilizada. O parâmetro de interseção, β , é calculado por meio da própria função de custos de conversão, após encontrar o valor de α . O parâmetro α , que é o parâmetro de inclinação, pode ser calculado a partir da elasticidade σ , de acordo com Gouel & Hertel (2006):

$$\sigma = \frac{\alpha}{CC} \cdot \frac{1}{\bar{h}/h - 1}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial h} = \frac{\alpha \bar{h}}{CC(\bar{h}-h)^2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha h}{CC\bar{h}}\right) > 0 \quad (21)$$

No entanto, um importante limitante é a ausência de dados ou informações sobre a elasticidade do custo de conversão de cada estado e macrorregiões brasileiras. Portanto, foi adotada uma abordagem simples, assim como em Gouel & Hertel (2006), para determinar essa elasticidade. Considera-se que quanto menos áreas passíveis a conversão houver em uma região, maior será a elasticidade do custo de conversão. Em contrapartida, quanto maior a área de floresta disponível para desmatamento, menor a elasticidade. Essa abordagem garante que quanto menos terra existir para desmatar, mais cara ficará a conversão. Dessa forma, após determinarmos os valores das elasticidades em cada região, torna-se possível o cálculo dos parâmetros. Os valores seguem na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Elasticidades e parâmetros da função de custo de conversão

Brasil e Macrorregiões	σ	α	β
Norte	0.450	248	242
Nordeste	1.181	260	257
Sudeste	0.901	791	794
Centro-Oeste	0.770	704	693
Sul	0.903	1824	1849
Brasil	0.724	663	602

Fonte: resultados da pesquisa

A equação do custo de conversão é negativa porque se trata de um custo. À medida que mais terras vão sendo convertidas, h aumenta e o numerador diminui, aumentando o custo de conversão, uma vez que o denominador da equação (20) é constante. Com o tempo, as terras marginais vão sendo utilizadas e o custo de conversão vai aumentando. O que se pretende capturar com essa abordagem é exatamente a taxa de aumento do custo de conversão, ou seja, a proporção e a velocidade com que o aumento ocorre. O custo irá sempre aumentar em maiores proporções que o desmatamento. Como a terra é escassa e seu nível de escassez é medido em termos de custos de oportunidade, o custo de conversão se torna uma boa proxy, que representa os custos de oportunidade de utilização da terra.

3 CHOQUES E SIMULAÇÕES

Todos os choques do modelo foram baseados nos cenários de expansão e estagnação projetados pela União da Indústria de Cana-De-Açúcar (UNICA) e apresentados na “Audiência Pública na Comissão Mista sobre Mudanças Climáticas: O papel do etanol para o Clima” em novembro de 2016. A definição dos cenários segue no Quadro 2, abaixo:

Quadro 1: Cenários de estagnação e expansão da cana-de-açúcar para o ano de 2030

Cenário de estagnação	Cenário de expansão
Apresenta a produção esperada em um contexto de manutenção do status quo, sem a implementação de políticas públicas que contemplem uma clara sinalização de incentivos de longo prazo direcionados à ampliação da produção doméstica de etanol. Nesse caso, tem-se a quase estagnação da produção de cana-de-açúcar, que cresce apenas para manter a participação do açúcar brasileiro no mercado mundial. A bioeletricidade exportada pelo setor sucroenergético ao grid deve se expandir, mas em função dos compromissos já firmados pelo setor até 2020. Após essa data são considerados apenas ganhos marginais de eficiência.	Retrata o crescimento possível da produção nacional de etanol diante da adoção de políticas efetivas de longo prazo que estimulem o aumento do setor sucroenergético na matriz energética nacional. Nesse cenário acredita-se que o consumo de etanol hidratado em 2030 possa ter uma participação de 31,5% do ciclo Otto (mesmo valor de 2009), assim como haveria condições para o desenvolvimento do etanol de segunda geração. Melhores políticas para o etanol conduzem a adoção das melhores tecnologias também no que diz respeito à maximização da bioeletricidade

Fonte: União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA) em “Audiência Pública na Comissão Mista sobre Mudanças Climáticas: O papel do etanol para o Clima”

De acordo com as projeções da UNICA, no cenário de estagnação, a produção de cana-de-açúcar será de 731 milhões de toneladas, e, no cenário de expansão, de 1.015 milhões de toneladas. O consumo de etanol combustível será de 21,6 bilhões de litros no cenário de estagnação e 50,9 bilhões de litros no cenário de expansão. Os hectares de área colhida de cana serão de 7,7 milhões no cenário de estagnação e 10,7 milhões no cenário de expansão. Se comparado com os hectares de área colhida em 2014, observa-se um aumento de 2 milhões de hectares no cenário de expansão e uma diminuição de 1 milhão no cenário de estagnação. Dessa forma, utilizando os dados estaduais de “Produção total de cana-de-açúcar” e “Cana-de-açúcar destina ao etanol”, safra 2015/2016, fornecidos pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) ⁸, foi calculada a quantidade de cana-de-açúcar destinada ao etanol em cada região do Brasil nos cenários de expansão e estagnação para 2030. A fim de investigar os objetivos propostos pela pesquisa, 5 cenários diferentes foram simulados. Os choques e suas descrições seguem no Quadro 3, abaixo:

Quadro 2: Descrição dos choques utilizados na pesquisa

Choques	Descrição
CH 1: Aumento nacional de demanda de cana-de-açúcar em um cenário de expansão	Foi simulado um aumento da oferta de cana-de-açúcar para satisfazer o aumento de uma demanda nacional hipotética de cana para etanol equivalente à do cenário de expansão do Quadro 2.
CH 2: Aumento nacional de demanda de cana-de-açúcar em um cenário de estagnação	Foi simulado um aumento da oferta de cana-de-açúcar para satisfazer o aumento de uma demanda nacional hipotética de cana para etanol equivalente à do cenário de estagnação do Quadro 2.
CH 3: Aumento regional de demanda de cana-de-açúcar em um cenário de expansão	Foi simulado um aumento da oferta de cana-de-açúcar para satisfazer o aumento de uma demanda regional hipotética de cana para etanol equivalente à do cenário de expansão do Quadro 2.
CH 4: Aumento regional de demanda de cana-de-açúcar em um cenário de estagnação	Foi simulado um aumento da oferta de cana-de-açúcar para satisfazer o aumento de uma demanda regional hipotética de cana para etanol equivalente à do cenário de estagnação do Quadro 2.

⁸ http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf

CH 5: Aumento da produtividade da terra destinada a produção de cana-de-açúcar	Foi simulado um aumento exógeno da produtividade de 2% da terra destinada à produção de cana-de-açúcar.
--	---

Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS

Na Tabela 5, abaixo, encontram-se os valores iniciais das terras destinadas às culturas em cada macrorregião, assim como os valores após a implementação de cada choque. Vale notar que as mudanças no uso da terra são consequência apenas dos choques simulados de aumentos na produção de cana-de-açúcar destinada ao etanol, ou seja, não captam nenhum outro efeito ou tendência observada nas economias das regiões nos últimos anos. Isso significa que os resultados aqui obtidos são isolados dos efeitos de desmatamento, expansão da fronteira agrícola, ou mesmo da regeneração de áreas de vegetação natural que possam estar ocorrendo como consequência de outros fenômenos socioeconômicos, como em Gurgel (2011).

Portanto, observa-se um aumento dos hectares destinados a culturas em todas as regiões do Brasil quando os choques aplicados foram de aumento da produção de cana-de-açúcar destinado ao etanol, ou seja, nos choques CH 1, CH 2, CH 3 e CH 4. Esse aumento das áreas cultivadas são ligeiramente maiores nos cenários de expansão que de estagnação e ocorrem de forma mais acentuada no Nordeste. Ressalta-se que o estudo em questão considera que expansões em área nessa região são possíveis somente nos estados do Maranhão, Piauí e Bahia (MAPIBA). Para o Brasil, de maneira geral, o aumento dos hectares destinados a culturas, nos cenários otimistas, CH 1 e CH 3, foram de 1,12 milhões de hectares e 91 mil hectares, respectivamente. Esses resultados mostram que um crescimento da produção de cana, para satisfazer um aumento de demanda, nacional ou regional, provoca uma expansão das áreas cultivadas, de forma a acomodar a necessidade de expansão da área plantada de cana-de-açúcar.

O choque de aumento da produtividade (CH 5) foi o único que provocou quedas nas áreas destinadas às culturas. Para o Brasil, a diminuição foi de 490 mil hectares, de forma mais acentuada no Nordeste. Verifica-se, portanto, que um aumento pequeno na produtividade da terra utilizada na produção de cana é capaz de acomodar o choque de expansão da produção de cana-de-açúcar, e ainda provocar um efeito poupa-terra. Ou seja, é necessário menos terra para produzir a mesma quantidade de culturas e cana-de-açúcar, o que indica que ganhos de produtividade na terra destinada à cana-de-açúcar poderia acomodar o cenário de expansão sem pressão por competição de terras.

Tabela 5: Área de terras destinadas as culturas, valores iniciais e após os choques (milhões de hectares)

Brasil e Macrorregiões	Área inicial	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5
Norte	4,84	4,95	4,86	4,90	4,85	4,83
Nordeste	11,15	11,64	11,25	11,59	11,24	10,98
Sudeste	20,50	20,64	20,53	20,73	20,55	20,45
Centro-Oeste	21,85	22,16	21,91	21,99	21,88	21,81
Sul	20,68	20,75	20,70	20,72	20,69	20,65
Brasil	79,01	80,13	79,24	79,92	79,20	78,71

Fonte: Resultados da pesquisa

Em relação às áreas destinadas a pastagens antes e após os choques, observa-se na Tabela 6, abaixo, uma diminuição de pastagens em todos os cenários e quase todas as regiões.

Ou seja, o aumento da produção de cana-de-açúcar ou da produtividade da terra destinada à cana provoca uma diminuição das pastagens em quase todas as macrorregiões brasileiras, com exceção da região Norte no CH 3, que apresentou ligeiro aumento das áreas de pastagem, e regiões Sul e Centro-Oeste em CH 5, que não apresentaram alterações significativas. A diminuição das pastagens é mais acentuada nos choques que representam os cenários otimistas, CH 1 e CH 3. Para o Brasil, por exemplo, 990 mil de hectares e 790 mil hectares diminuíram, respectivamente. Esse encolhimento é sentido principalmente nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste.

Essas regiões são tradicionalmente conhecidas como abundantes em pastagens e suas diminuições podem estar relacionadas com a conversão direta e indireta do uso da terra em prol do aumento da produção de cana. Como observado em Nassar et al. (2010), nos períodos entre 2005 e 2008, a cana-de-açúcar expandiu, na sua grande maioria, sobre as áreas de pastagens, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, e cerrado do Nordeste. O aumento da produtividade da terra utilizada na produção da cana também seria um incentivo para converter pastos em canaviais, principalmente nos Estados com abundância de pastagem e clima propício à plantação de cana-de-açúcar. Os resultados da pesquisa em questão também estão de acordo com os resultados do segundo cenário de expansão dos biocombustíveis de Gurgel (2011), segundo o qual ocorre uma perda significativa do Cerrado brasileiro (cuja extensão territorial abrange boa parte da região Centro-Oeste e MAPIBA) em prol do aumento de áreas de culturas.

No choque que representa a expansão da oferta da cana-de-açúcar regionalmente (CH 3), a região Norte apresentou um ligeiro aumento na área destinada à pastagem de 30 mil hectares, o que pode ser justificado pela diminuição das pastagens nas demais regiões. Uma vez que as demandas por alimentos, como leite e carne, não são alteradas na aplicação do choque, é esperado que ocorra uma competição pelo uso da terra entre os diferentes usos, com possível conversão indireta do uso da terra, diferenciada entre regiões, a fim de acomodar as necessidades de alimentos, que se alteram apenas devido a mudanças em preços relativos. O aumento das pastagens em algumas regiões e decréscimo em outras reflete essa competição, uma vez que as regiões com maior competitividade em cana alocam terras para essa cultura à custa de pastagens, impactando negativamente a produção pecuária, que por sua vez expande-se em regiões com menor resposta à expansão de cana-de-açúcar.

Tabela 6: Áreas de terras destinadas a pastagem, valores iniciais e após os choques (milhões de hectares)

Brasil e Macrorregiões	Área inicial	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5
Norte	38,41	38,40	38,41	38,44	38,41	38,41
Nordeste	27,79	27,38	27,71	27,43	27,72	27,77
Sudeste	32,37	32,20	32,34	32,09	32,32	32,36
Centro-Oeste	53,73	53,40	53,67	53,59	53,71	53,73
Sul	11,58	11,51	11,56	11,54	11,57	11,58
Brasil	163,87	162,88	163,69	163,08	163,73	163,86

Fonte: Resultados da pesquisa

Na Tabela 7, abaixo, apresentam-se os valores iniciais de desmatamento e os valores após os choques. O Brasil, como um todo, apresenta piora no desmatamento em todos os choques de aumento de demanda por cana-de-açúcar, com valores mais significativos, em termos de magnitude, naqueles cenários de expansão (CH 1 e CH 3). No choque CH 1, por exemplo, no Brasil, o desmatamento aumenta em 13 mil hectares, de forma mais expressiva nas regiões Norte e Nordeste. Nos cenários de estagnação (CH 2 e CH 4), o aumento do

desmatamento foi mais sutil. No choque CH 2, por exemplo, o desmatamento do Brasil foi de 5 mil hectares. Nesses cenários, as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul não apresentaram variações expressivas, deixando o Norte e o Nordeste absorverem todo o impacto sobre o desmatamento. Portanto, independente do choque, as evidências de competição entre cana-de-açúcar e floresta são claras, com impactos sobre as regiões com maior abundância de vegetação natural no país, o Norte e Nordeste (MAPIBA). Todavia, é importante destacar que o modelo assume a hipótese de ausência de ganhos de produtividade por avanço tecnológico e que, desse modo, os resultados de desmatamento devem ser interpretados com cautela.

Tais resultados estão condizentes com o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil, elaborado pelo Banco Mundial, que indica a conversão da vegetação nativa em uso para produção, em projeções para 2030. Tal conversa vegetativa ocorre, principalmente, nas regiões de fronteiras, na Região Amazônica; em menor escala, no Maranhão, no Piauí, no Tocantins e na Bahia. Nassar *et al.* (2010) salientam que cerca de 180 mil hectares de vegetação nativa foram convertidas de forma indireta, entre 2005 e 2008, em prol da expansão da cana-de-açúcar, principalmente no Sudeste e cerrado do Centro-Oeste e Nordeste, corroborando com os resultados da pesquisa em questão, que indicam um desmatamento indireto nessas regiões, decorrente de uma expansão na oferta de cana-de-açúcar destinada ao etanol.

No cenário de aumento da produtividade da terra destinada à cana-de-açúcar, observa-se uma diminuição nacional no desmatamento em 31 mil hectares, com melhora, principalmente, na região Nordeste. Isso indica que avanços tecnológicos que permitam ganhos em produtividade da terra diminuem, de forma expressiva, o desmatamento e atuam como mitigador das emissões diretas do uso da terra. Segundo o Banco Mundial, uma forma de eliminar as causas estruturais do desmatamento seria aumentar drasticamente a produtividade por hectare, tanto de culturas quanto pastagens. O estudo, portanto, está ao encontro da teoria por trás da proposta do Banco Central.

Tabela 7: Área de terras desmatadas, valores iniciais e após os choques (milhões de hectares)

Brasil e Macroregiões	Área inicial	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5
Norte	0,72	0,82	0,74	0,81	0,74	0,71
Nordeste	0,45	0,53	0,48	0,52	0,47	0,26
Sudeste	0,08	0,07	0,08	0,04	0,08	0,04
Centro-Oeste	0,40	0,37	0,40	0,40	0,40	0,36
Sul	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,02
Brasil	1,70	1,83	1,75	1,83	1,75	1,39

Fonte: Resultados da pesquisa

Na Tabela 8, encontram-se as áreas de terras destinadas à cana-de-açúcar, antes e após os choques. Como era de se esperar, observa-se um aumento da área plantada de cana em todos os choques. Nos choques que representam o cenário de expansão, CH 1 e CH 3, os aumentos de área plantada, para o Brasil, foram de 2,05 milhões de hectares e 1,76 milhões de hectares, respectivamente, condizentes com a previsão da UNICA para 2030, cuja expansão é de 2 milhões de hectares. Nesses cenários otimistas, a expansão ocorre, principalmente, nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. A região Norte é a que apresenta menor variação da área plantada de cana. O mesmo padrão de crescimento se verifica nos choques que representam os cenários de estagnação (CH 2 e CH 4). No entanto, os valores de expansão são mais modestos. Para o Brasil, por exemplo, ocorre um aumento de 400 mil hectares em CH 2 e 340 mil hectares em CH 4.

Os choques que representam a expansão da cana-de-açúcar de forma nacional (CH 1 e CH 2) deixa clara a vantagem comparativa das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. Os choques que representam a expansão da cana regionalmente (CH3 e CH4) captam a especialização da região Sudeste e Nordeste na produção. Já o choque de produtividade (CH 5) apresenta um modesto aumento nas áreas plantadas de cana, para o Brasil, no valor de 10 mil hectares. A variação ocorre exclusivamente na região Nordeste.

Tabela 8: Área de terras destinadas a cana-de-açúcar, inicial e após os choques (milhões de hectares)

Brasil e Macroregiões	Área inicial	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5
Norte	0,06	0,19	0,08	0,14	0,07	0,06
Nordeste	1,19	1,82	1,32	1,75	1,30	1,20
Sudeste	6,96	7,43	7,05	7,65	7,09	6,96
Centro-Oeste	1,96	2,50	2,06	2,24	2,02	1,96
Sul	0,70	0,98	0,75	0,85	0,73	0,70
Brasil	10,87	12,92	11,27	12,63	11,21	10,88

Fonte: Resultados da pesquisa

Uma forma de verificar se, de fato, a expansão da cana-de-açúcar ocorre sobre as áreas destinadas as culturas é analisando as variações absolutas dessas áreas após os choques. Se a variação da área de cana for maior que a variação das áreas de culturas, podemos assumir uma conversão direta do uso da terra. Dessa forma, segue na Tabela 9 a variação absoluta das áreas de cana e áreas de cultura em todos os choques aplicados na pesquisa. Verifica-se que, de fato, as expansões das áreas de cana são maiores que as áreas de culturas, em todos os cenários, e que, inclusive, ocorre uma diminuição das áreas de culturas no cenário de aumento de produtividade da terra (CH 5). Nos cenários otimistas (CH 1 e CH 3), o gap entre as variações absolutas são mais expressivos que nos cenários pessimistas (CH 2 e CH 4), principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul.

Na região Sudeste, por exemplo, no choque CH 1, um aumento da demanda por cana-de-açúcar destinada ao etanol provoca um aumento da área cultivada de 0,15 milhões de hectares e um aumento da área plantada de cana-de-açúcar de 0,47 milhões de hectares, o que indica que houve uma grande conversão de terras que seriam destinadas a outras culturas, as quais passaram a ser destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar. É interessante observar essa mesma região no choque regional otimista (CH 3), cuja variação das áreas de culturas são de 0,23 milhões de hectares e das áreas de cana-de-açúcar são 0,69 milhões de hectares, apresentando o maior gap dentre todas as regiões e choques do modelo. Esse resultado, mais uma vez, é impulsionado pelo fato de a região ser a maior produtora de cana-de-açúcar e outras culturas no Brasil.

Tabela 9: Variação absoluta das áreas de cana e áreas de cultura (milhões de hectares)

Brasil e Macroregiões	CH 1		CH 2		CH 3		CH 4		CH 5	
	Cultura	Cana	Cultura	Cana	Cultura	Cana	Cultura	Cana	Cultura	Cana
Norte	0,11	0,14	0,02	0,03	0,06	0,08	0,01	0,02	-0,01	0,00
Nordeste	0,49	0,63	0,10	0,13	0,44	0,56	0,09	0,11	-0,17	0,01
Sudeste	0,15	0,47	0,03	0,09	0,23	0,69	0,05	0,13	-0,04	0,00
Centro-Oeste	0,31	0,54	0,06	0,10	0,15	0,28	0,03	0,05	-0,04	0,00
Sul	0,07	0,28	0,01	0,05	0,04	0,15	0,01	0,03	-0,03	0,00

Brasil	1,12	2,05	0,23	0,40	0,91	1,76	0,19	0,34	-0,30	0,01
--------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------

Fonte: Resultados da pesquisa

A variação da área de cana-de-açúcar após um choque de expansão pode ocorrer sobre a área total de culturas, sobre as áreas de pastagens ou, até mesmo, sobre a vegetação nativa, intensificando o desmatamento. O modelo utilizado na pesquisa em questão não permite identificar qual a transição de terras que de fato ocorreu, mas permite identificar quantos hectares de terras foram convertidos, como consequência dos efeitos diretos e indiretos do processo de conversão. Portanto, segue na Tabela 10 a comparação entre os valores absolutos da área de expansão da cana-de-açúcar, da conversão de pastagens e de desmatamento. Verifica-se, nos dois principais choques de expansão otimista da cana-de-açúcar destinada ao etanol (CH 1 e CH 3), que há uma diminuição das áreas destinadas à pastagem em, praticamente, todas as regiões do Brasil, com exceção da Norte, no cenário regional CH 3. Além disso, observa-se uma piora nacional do desmatamento, com maior intensidade nas regiões Norte e Nordeste.

Para o Brasil, por exemplo, no choque CH 1, a expansão da área de cana-de-açúcar foi de 2,05 milhões de hectares, com sacrifício de 0,13 milhões de hectares de vegetação nativa e conversão de pastagem em culturas no valor de 0,99 milhões de hectares. Esse sacrifício de vegetação nativa pode ter sido graças à conversão direta ou indireta do uso da terra. Como essas conversões não são suficientes para acomodar a expansão total da cana-de-açúcar, podemos concluir que parte do crescimento canavieiro ocorre sobre as áreas de culturas. No mesmo cenário, a região Nordeste é a que apresenta a maior queda absoluta de pastagem e é a segunda região com a maior taxa absoluta de desmatamento. Ou seja, para acomodar uma expansão da cana-de-açúcar de 0,63 milhões de hectares, foram necessários um aumento no desmatamento de 0,08 milhões de hectares e uma diminuição nas pastagens de 0,41 milhões de hectares. Como a soma dos hectares convertidos não satisfazem a expansão da cana-de-açúcar, podemos concluir que parte da conversão na região Nordeste ocorreu sobre as áreas de culturas, assim como verificado para o Brasil, como um todo.

É interessante observar as variações da região Norte no choque de expansão regional CH 3. Para satisfazer o aumento da área cultivada de cana-de-açúcar de 0,08 milhões de hectares, houve um aumento absoluto das áreas destinadas à pastagem, no valor de 0,03 milhões de hectares, além de um aumento no desmatamento de 0,09 milhões de hectares. Isto é, a soma das áreas convertidas foi superior às áreas necessárias para acomodar a expansão da cana-de-açúcar, o que indica que a região utiliza essas áreas para suprir a diminuição de culturas e pastagens das demais regiões.

Tabela 10: Variação absoluta das áreas de cana-de-açúcar, pastagem e desmatamento, nos choques otimistas, CH 1 e CH 3 (milhões de hectares)

Brasil e Macroregiões	CH 1			CH 3		
	Cana	Pastagem	Desmat.	Cana	Pastagem	Desmat.
Norte	0,14	-0,01	0,10	0,08	0,03	0,09
Nordeste	0,63	-0,41	0,08	0,56	-0,36	0,07
Sudeste	0,47	-0,16	-0,02	0,69	-0,28	-0,04
Centro-Oeste	0,54	-0,33	-0,02	0,28	-0,14	0,00
Sul	0,28	-0,07	-0,01	0,15	-0,04	0,00
Brasil	2,05	-0,99	0,13	1,76	-0,79	0,13

Fonte: Resultados da pesquisa

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi verificar o impacto de um aumento da oferta de cana-de-açúcar destinada ao etanol sobre o uso da terra no Brasil, em cenários de expansão e estagnação da produção. Para tornar a análise factível, alguns aprimoramentos no modelo Projeto de Análise de Equilíbrio Geral (PAEG) foram efetuados. Uma das modificações no modelo foi a incorporação de um módulo de uso da terra e um custo de conversão entre os diferentes tipos de terras, abordado explicitamente, permitindo capturar as mudanças diretas e indiretas do uso da terra decorrente de uma expansão da cana-de-açúcar destinada ao etanol.

Os resultados sugerem que a grande disponibilidade de terras aptas à conversão no Brasil, seja pela existência de extensas áreas de pastagens ou pela imensa área de cobertura vegetal, permite acomodar o crescimento da cultura da cana-de-açúcar projetado para o ano de 2030. Porém, isso ocorreria às custas de impactos significativos sobre o uso da terra. Em todos os choques de aumento da oferta de cana-de-açúcar destinada ao etanol, tanto nos cenários expansão quanto estagnação, os resultados indicaram aumento das áreas de terras destinadas não somente à cana-de-açúcar, mas também às demais culturas. Esse aumento ocorreu em todas as regiões do Brasil, de forma mais acentuada no Nordeste. O crescimento das áreas destinadas à cana-de-açúcar ocorreu, principalmente, nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste. Estas regiões apresentaram vantagem comparativa na produção canavieira. Em todos os choques e regiões foi observada diminuição das pastagens, de forma mais acentuada nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste. A exceção foi da região Norte, no choque regional de expansão otimista. O Brasil, de maneira geral, apresentou piora no desmatamento em todos os choques, de forma mais acentuada nas regiões Norte e Nordeste.

Como as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste são tradicionalmente conhecidas como abundantes em pastagens, a diminuição dessas áreas pode estar relacionada com a conversão direta e indireta do uso da terra em prol do aumento da produção de cana. Já o aumento da pastagem na região Norte no choque regional de expansão pode ser justificado pela diminuição das pastagens nas demais regiões. Uma vez que as demandas por alimentos, como leite e carne, não são alteradas na aplicação do choque, é esperado que ocorra uma competição pelo uso da terra entre os diferentes usos, com possível conversão indireta do uso da terra diferenciada entre regiões, a fim de acomodar as necessidades por alimentos. A piora no desmatamento nas regiões Norte e Nordeste, por sua vez, está condizente com os estudos que indicam que a conversão da vegetação nativa em uso para produção ocorrerá, em maior escala nas regiões de fronteiras, na Região Amazônica, e em menor escala no Maranhão, no Piauí, no Tocantins e na Bahia.

Ao verificar se a expansão da cana-de-açúcar ocorre sobre as áreas destinadas às culturas, ou seja, se ocorre uma conversão direta do uso da terra, constata-se que, de fato, as expansões das áreas de cana são maiores que as áreas de culturas, em todos os cenários, principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul. Além disso, a diminuição das pastagens e aumento do desmatamento, em quase todas as regiões, não são suficientes para satisfazer a expansão da cana-de-açúcar, permitindo concluir que parte da conversão ocorre sobre as áreas de culturas. Somente na região Norte se verifica o inverso. Nessa região, a soma das áreas convertidas foram superiores às áreas necessárias para acomodar a expansão da cana-de-açúcar, o que indica que a região utiliza essas áreas para suprir a diminuição de culturas e pastagens das demais regiões.

Os resultados do choque que simula um aumento da produtividade da terra destinada à cana-de-açúcar são um pouco mais otimistas: indicam que um aumento de 2% de produtividade provoca um acréscimo modesto nas áreas plantadas de cana, de forma

concentrada na região Nordeste. Há também uma queda nas áreas destinadas às culturas, também de forma mais acentuada no Nordeste. Além disso, não se obteve nenhuma variação significativa nas áreas de pastagem. Em relação ao desmatamento, ocorre uma diminuição nacional de 31 mil hectares, com melhora principalmente na região Nordeste. Portanto, verifica-se que um aumento pequeno na produtividade da terra utilizada na produção de cana é capaz de acomodar o choque de expansão da produção de cana-de-açúcar e ainda provocar um efeito poupa-terra. Tal fato indica que ganhos de produtividade na terra destinada à cana-de-açúcar poderia acomodar o cenário de expansão sem pressão por competição de terras. Também concluiu-se que avanços tecnológicos que permitam ganhos em produtividade da terra diminuem, de forma expressiva, o desmatamento e atuam como mitigador das emissões diretas do uso da terra.

Por fim, acredita-se que uma análise minuciosa dos padrões de mudança de uso da terra, e a capacidade de prever essas mudanças, é necessária para o planejamento regional e para a formulação de políticas de desenvolvimento do uso da terra. A formulação aqui desenvolvida pode servir como instrumento de representação das possibilidades de expansão da cultura da cana-de-açúcar destinada ao etanol dentre as regiões brasileiras. Isso segue a racionalidade econômica de permitir a conversão primeiramente das áreas de menor custo e facilidade de acesso, de acordo com a ideia ricardiana do uso da terra. Além disso, captura os diferentes custos de conversão das macrorregiões brasileiras e os preços de áreas de uso agropecuário e de vegetação natural.

No entanto, o modelo não leva em conta outros fatores que podem afetar a dinâmica das mudanças no uso da terra, como aspectos socioculturais, políticas públicas e pressões internacionais. Também, sendo o modelo estático, não há evolução na produção dos demais insumos agropecuários e fatores produtivos. Como observado por Gurgel (2007), em uma economia dinâmica, o crescimento da população, o acúmulo de capital e o investimento em setores lucrativos em expansão poderiam atenuar ou mesmo reverter a queda na produção de alguns setores agrícolas, aumentando a demanda pelo fator terra e a pressão sobre a expansão da fronteira agrícola. Além disso, em um modelo dinâmico seria possível considerar o crescimento da produtividade da terra, o que poderia contrabalancear a necessidade de desmatamento das áreas de vegetação nativas.

Assim, a sugestão para os estudos futuros é acrescentar aspectos dinâmicos de expansão dos fatores produtivos, incrementos na produtividade agrícola e oportunidades de investimento nas economias, além de considerar o aumento na demanda de outros produtos agrícolas, não somente dos insumos energéticos. É importante também conseguir mensurar os efeitos do crescimento dos insumos energéticos sobre as mudanças na agricultura e no uso da terra, não somente no Brasil, mas também nas demais regiões do mundo. Ademais, é preciso tentar incorporar a utilização dos insumos dos biocombustíveis de segunda geração no processo de modelagem e nas análises.

REFERENCIAS

GAZZONI, D.L. **O impacto do uso da terra na sustentabilidade dos biocombustíveis. Documentos.** Embrapa Soja. N. 347. 2014. 80p.

LAPOLA, David M. et al. **Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil.** Proceedings of the national Academy of Sciences, v. 107, n. 8, p. 3388-3393, 2010.

FERREIRA FILHO, J. B.; HORRIDGE, J. M. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. **Land Use Policy**, vol. 36, p. 595-604, 2014.

SCHMITZ, Christoph et al. **Land-use change trajectories up to 2050: insights from a global agro-economic model comparison**. *Agricultural Economics*, v. 45, n. 1, p. 69-84, 2014.

GLOBAL TRADE ANALYSIS PROJECT – GTAP, 2001. Disponível em: <http://www.agecon.purdue.edu/gtap/>

GOUEL, C; HERTEL, T. **Introducing forest access cost functions into a general equilibrium model**. GTAP Working Research Memorandum, n. 8, 2006.

GURGEL, A. C. **Impacto da política americana de estímulo aos biocombustíveis sobre a produção agropecuária e o uso da terra**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 49(1), p. 181-124, 2011.

GURGEL, A.C.; PEREIRA, M.W.G.; TEIXEIRA, E.C. **A estrutura do PAEG**. PAEG Technical Paper, n. 1, 2014.

GURGEL, Angelo et al. CGE Models: Linking Natural Resources to the CGE Framework. In: world scientific reference on natural resources and environmental policy in the era of global change: Volume 3: **Computable General Equilibrium Models**. 2016. p. 57-98.

HERTEL, T. **Global trade analysis: modeling and applications**. Cambridge and New York: Cambridge University Press, UK, 1997, apud HERTEL, T. W.; TYNER, W. E.; BIRUR, D. K.

RUTHERFORD, T. F. **GTAP6inGAMS: The dataset and static model**. p.42, 2005. <<http://www.mpsge.org/gtap6/gtap6gams.pdf>>

RUTHERFORD, T. F., PALTSEV, S. V. **GTAPinGAMS and GTAP-EG: global datasets for economic research and illustrative models**. Working Paper, Department of Economics, University of Colorado, p.64, 2000.