



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

MARCELO MELO RAMALHO MOREIRA

**Estratégias para Expansão do Setor
Sucroenergético e suas Contribuições para
a NDC Brasileira**

**Strategies for Expansion of the Sugar-
Energy Sector and its Contributions for
the Brazilian NDC**

CAMPINAS
2016

MARCELO MELO RAMALHO MOREIRA

**Estratégias para Expansão do Setor
Sucroenergético e suas Contribuições para
a NDC Brasileira**

**Strategies for Expansion of the Sugar-
Energy Sector and its Contributions for
the Brazilian NDC**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO MARCELO MELO RAMALHO MOREIRA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. Arnaldo Cesar da Silva Walter.



.....

CAMPINAS
2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Moreira, Marcelo Melo Ramalho, 1980

M813e Estratégias para expansão do setor sucroenergético e suas contribuições para a NDC brasileira / Marcelo Melo Ramalho Moreira. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter.

Coorientador: Marcelo Pereira da Cunha.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Etanol. 2. Cana-de-açúcar. 3. Sustentabilidade. 4. Mudanças climáticas.
I. Walter, Arnaldo Cesar da Silva, 1957-. II. Cunha, Marcelo Pereira da, 1967-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Strategies for expansion of the sugar-energy sector and its contributions for the Brazilian NDC

Palavras-chave em inglês:

Ethanol

Sugarcane

Sustainability

Climate changes

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Arnaldo Cesar da Silva Walter [Orientador]

Joaquim Abel Seabra

Manoel Regis Lima Verde Leal

Angelo Costa Gurgel

Luciano Rodrigues

Data de defesa: 20-12-2016

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

TESE DE DOUTORADO

**Estratégias para Expansão do Setor
Sucroenergético e suas Contribuições para
a NDC Brasileira**

Autor: Marcelo Melo Ramalho Moreira

Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter

Coorientador: Marcelo Pereira da Cunha

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Manoel Regis Lima Verde Leal
Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol

Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel
Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas (FGV/EESP)

Prof. Dr. Luciano Rodrigues
Depto. Economia, Administração e Sociologias, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".
Universidade de São Paulo.

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 20 de dezembro de 2016.

Dedico à DD.

Agradecimentos

A minha mãe, por todo o carinho e pelo exemplo.

Ao meu pai (in memoriam), pelo entusiasmo pelas energias renováveis.

Aos familiares, pela estrutura.

Ao Arnaldo Walter, Marcelo Cunha e Régis Leal, por terem percebido a importância do tema, muito antes de mim.

Aos membros da banca, pelas sugestões e correções.

Aos meus irmãos, Renata, Raphael e Julien.

Aos amigos da UNICAMP, Agroicone e CTBE.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos amigos, por não deixar faltar a diversão.

Resumo

Em 2015, antes da 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (COP21), o Brasil assumiu o compromisso de reduzir suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em 43%, em 2030, em relação às de 2005. Caberá ao setor sucroenergético significativa contribuição para o cumprimento dessa meta, tanto com a substituição da gasolina automotiva quanto com a geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar. A presente tese tem como objetivo principal avaliar de maneira sistêmica a contribuição do setor no combate às mudanças do clima, combinando técnicas de planejamento energético, a modelagem de uso da terra e a avaliação de emissões de GEE, nesse caso considerado o ciclo de vida dos energéticos. O método baseia-se em simulações com uso de uma versão melhorada do modelo BLUM (*Brazilian Land Use Model*), o que exigiu identificação do perfil regional da indústria sucroenergética e das respectivas tendências até 2030. Nas simulações, foram consideradas políticas de estímulo à bioeletricidade, precificação do carbono da gasolina e a produção de etanol de segunda geração (2G). Quando não são consideradas políticas para a diferenciação dos preços do etanol em relação à gasolina, os resultados são distantes das metas de produção e de consumo de etanol automotivo, o que levou à conclusão de que o foco exclusivo no desenvolvimento tecnológico provavelmente não será suficiente para cumprir com os objetivos de redução das emissões de GEE. Por outro lado, quando considerado o Custo Social do Carbono emitido pela gasolina, os resultados são muito mais significativos. A tecnologia 2G pode aumentar significativamente a disponibilidade de etanol no mercado, contribuindo para o cumprimento das metas. Porém, os resultados indicam um efeito *crowding-out* (o etanol 2G compete tanto com a gasolina quanto com o etanol de primeira geração) de até 20%; o efeito *crowding-out* do etanol 2G é menor na presença de políticas de precificação do carbono. A melhor remuneração da bioeletricidade resulta maior adoção de modernos sistemas de cogeração, e excedentes de bioeletricidade significativos, porém, apenas com bagaço como combustível os resultados ficam abaixo do almejado para a redução das emissões de GEE. Já a complementação com palha da cana-de-açúcar eleva não só o excedente de bioeletricidade, mas também a produção e o consumo de etanol, o que

evidencia a existência de efeitos sinérgicos, via rentabilidade, entre bioeletricidade e produção de etanol. Mesmo contabilizadas as emissões diretas e indiretas de uso da terra, as emissões da produção de cana-de-açúcar são pequenas comparativamente aos benefícios. Já a análise de sensibilidade em relação ao fator de emissão da eletricidade na linha de base indica resultados bastante amplos, porém sem alterar as principais conclusões. Nas condições consideradas neste estudo, o benefício do etanol de primeira geração e da geração de eletricidade excedente (inclusive com palha), quanto às emissões de GEE, pode ser maior que o do etanol 2G, uma vez que o efeito indireto de uso da terra é pequeno no Brasil. Cabe destacar que as conclusões deste estudo são válidas unicamente para avaliação de redução de GEE (uma vez que outras análises ambientais não foram realizadas) e não podem ser automaticamente replicadas para outros territórios, particularmente nos quais a restrição de área é mais severa.

Palavras-chave: uso da terra, etanol, cana-de-açúcar, sustentabilidade, modelagem, mudanças climáticas, gases de efeito estufa.

Abstract

Under the scope of the Paris Agreement, Brazil committed himself to strongly reduce its Greenhouse Gases (GHG) emissions, requiring reducing them by 43% in 2030 compared to 2005. The sugarcane industry will have a significant contribution to the achievement of such goal, through the displacement of automotive gasoline and the generation of electricity from the residual biomass from sugarcane. The main objective of this thesis is to evaluate in a systemic way the contribution of the sector in combating climate change, combining techniques of energy planning, land use modeling and GHGs emissions assessment, in this case considered the full life cycle of energy sources. The method is based on long-term simulations, using an improved version of the BLUM (Brazilian Land Use Model) model, which required regional identification of the sugarcane industry profile and trends up to 2030. The scenarios considered policies to foster bioelectricity generation, the Social Cost of Carbon (SCC) into gasoline pricing structure, as well as the production of second generation (2G) ethanol. When carbon pricing is not considered, the results are far from the expected levels of production and consumption of automotive ethanol, leading to the conclusion that with the exclusive focus on technological development it is unlikely to achieve the goals regarding reduction of GHGs emissions. On the other hand, when the SCC emitted is considered on gasoline pricing structure, the results are much more significant. The 2G technology can significantly increase the availability of ethanol in the market, contributing to the achievement of the commitment targets. However, the results indicate a crowding-out effect (where 2G ethanol competes with both gasoline and first-generation ethanol) of up to 20% of additional 2G ethanol. The crowding-out effect of 2G ethanol is lower in the presence of carbon pricing policies. The higher price of bioelectricity results in a higher adoption of modern cogeneration systems and significant bioelectricity surpluses, but the results are still below the expected bioelectricity levels when bagasse is the only fuel used in cogeneration systems. However, when sugarcane trash is added into cogeneration (as a complementary fuel), bioelectricity surplus increases significantly, inducing also the production and consumption of ethanol. This shows the existence of synergistic effects, via profitability, between bioelectricity and ethanol production. The sensitivity analysis on the baseline electricity emission factor indicates

quite broad results, but without affecting the main conclusions. Under the conditions considered in this study, it is possible to conclude that the benefits of first-generation ethanol combined with significant surplus electricity (including straw as fuel) may be larger in terms of GHG emissions than 2G ethanol, since the indirect land use effect found to be small in Brazil. It should be noted that these conclusions are valid for Brazil and solely for the objectives of GHGs emission reductions (no other sustainability indicator was evaluated) and cannot be replicated to other territories, particularly the ones where land use restrictions are more severe.

Keywords: NDC, sugarcane, land use change, ethanol, life cycle assessment, sustainability

Lista de Tabelas

Tabelas em Português

Tabela 1: Principais parâmetros para estimativa do CSC contido na gasolina A.....	105
Tabela 2: Emissões de GEE (on site) por tipo de tecnologia adotada (kgCO ₂ eq/t cana)	108
Tabela 3: Principais indicadores tecno-econômicos para diferentes configurações de usinas consideradas neste estudo.....	112
Tabela 4: Níveis de atividade em 2030 das variáveis selecionadas para análise.	115
Tabela 5 Fatores de emissão por tipo de mudança de uso da terra (30 anos, tonelada CO ₂ eq/ha).....	128
Tabela 6: Estimativa do Custo Social do carbono da gasolina A em diversos anos. ...	130

Tabelas em Inglês

Table 1 Yields and total base investment (2015 figures) for different mill configurations, considering 2 Mt/year.....	68
Table 2 Regional industry profile in 2014/15, according to final products and annual crush	69
Table 3: Estimate of regional characteristics of electricity sales by sugarcane mills in 2014/15	70
Table 4: Estimated sugarcane yield to electricity in mills that sold electricity in 2014/15 harvest season (efficiency and regional share of each technological range)..	72
Table 5: Simulation results (supply and demand section).....	78
Table 6: Changes in land use in 2030 compared to Reference scenario (1,000 ha).....	79
Table 7: Balance of GHGs emissions - comparison of the two Progressive scenarios vis- à-vis the Reference one (GtCO ₂ eq)	82
Table 8: Regional agricultural characteristics of sugarcane production (2010/11 harvest season)	89
Table 9: Total electricity exported by the sugarcane mills (TWh).....	89
Table 10: Net area variation by land type (1000 ha) – results for 2030	94
Table 11 Land use change by land type (1000 ha) – results for 2030.....	94
Table 12: Emission factor in 30 years by type of land use change (tonne CO ₂ eq /ha)..	94

Lista de Figuras

Figuras em Português

Figura 1: Fluxo histórico de unidades produtoras do setor sucroenergético entre 2005 e 2015 (número de unidades)	19
Figura 2: Regiões consideradas no modelo BLUM.....	39
Figura 3: Interações entre os produtos e setores no BLUM	40
Figura 4: Cenários considerados neste estudo.....	113
Figura 5: Emissões acumuladas em comparação ao cenário de referência (milhões de toneladas de CO ₂ eq)	117
Figura 6: Distribuição de frequência do custo social do carbono em 2020.....	129

Figuras em Inglês

Figure 1: Brazilian regions considered in the BLUM model	63
Figure 2: Agricultural and pasture areas (thousand hectares) in 2010 and 2030, for the Reference scenario.....	76
Figure 3: Crush of sugarcane by mill type in 2010 and 2030, according to the scenarios (thousand tonnes).....	77
Figure 4: Sugarcane technological profile for the South region.....	90
Figure 5: Sugarcane technological profile for the Southeast region	90
Figure 6: Sugarcane technological profile for the Northeast Coast region	92
Figure 7: Sugarcane technological profile for the Northeast Cerrado region.....	92
Figure 8: Dynamics of bioelectricity indirect effects	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

2G: Segunda Geração

AEZ: Agro-Ecological Zones

AFOLU: Agriculture Forest and Other Land Use

BLUM: Brazilian Land Use Model; Modelo de Uso da Terra para Agricultura Brasileira

BNDES: Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

BVC: Biorrefinaria Virtual

CARB: California Air Resources Board

CARD: Center for Agricultural and Rural Development

CEPPI: Centre D' Études Prospectives et d'Informations Internationales

CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CIDE: Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

COP: Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

CSC: Custo Social do Carbono

CTBE: Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol

DRIA: Draft Regulatory Impact Analysis

EAV: Equivalent Annual Value

EPA: Environmental Protection Agency

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

ESALQ: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo

EU: European Union

FAO: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

FAPRI: Food and Agricultural Policy Research Institute

FASOM: Forestry Agriculture Sector Optimization Model

FBMC: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas

FFV: Flex-Fuel Vehicle

FQD: Fuel Quality Directive

GDP: Gross Domestic Product

GEE: Gases de Efeito Estufa

GHG: Greenhouse Gases

GNV: Gás Natural Veicular

GTAP: Global Trade Analysis Project

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICONE: Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais

IEA: International Energy Agency

IFPRI: International Food Policy Research Institute

IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis

iLUC: Indirect Land Use Change

INDC: Intended Nationally Determined Contribution; Con

IPCA: Índice Nacional de Preço ao Consumidor Amplo

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

JRC: Joint Research Center

LAPIG: Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento

LCFS: Low Carbon Fuel Standard

LUC: Land Use Change

NDC: Nationally Determined Contributions

PAT: Programa de Avaliação Tecnológica

PIB: Produto Interno Bruto

PS1: First Progressive Scenario

PS2: Second Progressive Scenario

REA: Retorno Equivalente Anual

RED: Renewable Energy Directive

RFS: Renewable Fuel Standard

SCC: Social Carbon Cost

SIG: Sistema de Informação Geográficas

CO₂eq: Dióxido de carbono equivalente

TRS: Total Recoverable Sugar

UNFCCC: Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

UNICA: União da Indústria de Cana-de-açúcar

USEPA: United States Environmental Protection Agency

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL	17
O papel dos biocombustíveis na NDC brasileira.....	17
Histórico recente do etanol no Brasil	18
A necessidade de abordagens sistêmicas na análise de biocombustíveis.....	21
Objetivo.....	24
Estrutura da tese	24
Referências da introdução	26
1 MODELOS DE USO DA TERRA	30
1.1 Revisão dos modelos de uso da terra.....	30
1.2 O modelo BLUM	36
1.2.1 Visão geral.....	36
1.2.2 Módulo de oferta e demanda	37
1.2.3 Módulo de Uso da Terra.....	40
1.2.4 Detalhamento do módulo de uso da terra.....	42
1.2.5 Detalhamento do setor sucroenergético	47
1.3 Referências do Capítulo 1	55
2 LAND USE AND OTHER INDIRECT IMPACTS OF LARGE SCALE ADOPTION OF HIGH EFFICIENCY COGENERATION SYSTEMS IN SUGARCANE ETHANOL MILLS' 59	
2.1 Abstract	59
2.2 Introduction	60
2.3 Methodology	62
2.4 Results	66
2.4.1 Regional profile of the sugarcane sector	66
2.4.2 Regional profile of sugarcane mills.....	69
2.4.3 Simulations.....	73
2.5 Conclusions	83
2.6 References	85
2.7 Supplementary Material	89
2.7.1 Appendix: Data for regional profile of the sugarcane sector	89
2.7.2 Appendix: Time series of the recent industry profile.....	90
2.7.3 Appendix: Dynamics of bioelectricity indirect effects (graphic representation) 93	
2.7.4 Appendix: Data used for land use GHG calculations.....	94
3 AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO POTENCIAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	95
3.1 Resumo.....	95

3.2	Introdução	96
3.3	Objetivo.....	98
3.4	O cenário tecnológico e regulatório atual e principais alternativas.....	99
3.4.1	Tecnologias para o etanol de cana-de-açúcar.....	99
3.4.2	Precificação do carbono	102
3.5	Método	105
3.5.1	Modelo BLUM.....	105
3.5.2	Emissões.....	107
3.5.3	Cenários.....	109
3.6	Resultados	113
3.6.1	Níveis de atividade	114
3.6.2	Emissões de GEE	117
3.7	Conclusões e recomendações	119
3.8	Referências do Capítulo 3	123
3.9	Material suplementar.....	128
3.9.1	Anexo: Fatores de emissão para mudança de uso da terra	128
3.9.2	Anexo: Distribuição de Probabilidade do Custo Social do Carbono.....	129
3.9.3	Apêndice: Cálculo do Custo Social do Carbono na gasolina A (R\$/l).....	130
4	CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

INTRODUÇÃO GERAL

O papel dos biocombustíveis na NDC brasileira

No contexto do desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação da pobreza, o Acordo de Paris, aprovado em dezembro de 2015 na 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (COP21), é um marco global nos esforços de combate às mudanças do clima. Nele, 195 países, mais a União Europeia, definem como a humanidade enfrentará o aquecimento global nas próximas décadas. Os objetivos do Acordo são: limitar o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, procurando alcançar a meta de 1,5°C; aumentar a capacidade de se adaptar aos efeitos das mudanças do clima e; criar fluxos financeiros para fomentar ações de mitigação, adaptação e desenvolvimento (UN, 2015).

Em setembro de 2015, o governo brasileiro submeteu à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima sua pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (Intended Nationally Determined Contribution – iNDC, em inglês) como parte do esforço de negociação internacional que resultou o Acordo, em dezembro de 2015.

Segundo a iNDC (Brasil, 2015), o Brasil pretende adotar medidas adicionais, em relação àquelas já implementadas, que são consistentes com a meta de elevação de 2°C na temperatura da Terra. Em particular, devem ser adotadas medidas na área de bioenergia, no setor florestal e uso da terra, assim como no setor de energia. Uma leitura cuidadosa da iNDC permite identificar a participação dos biocombustíveis nas três medidas citadas. Especificamente:

- Aumentar a participação da bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18%, até 2030, expandindo o consumo de biocombustíveis, aumentando a oferta de etanol, inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a parcela de biodiesel na mistura com o diesel.

- Expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação da geração eólica, com biomassa e solar.
- Embora não mencionado individualmente, o setor de bioenergia será ainda importante no cumprimento de metas de uso da terra, pois está diretamente vinculado ao cumprimento do Código Florestal - protegendo áreas com remanescentes e restaurando vegetação nativa em áreas em não conformidade com a lei florestal.

Em 2015, os produtos da cana-de-açúcar e biodiesel somaram cerca de 18% da oferta interna de energia, sendo aproximadamente 17% e 1% as suas participações individuais, respectivamente. Já as fontes de eletricidade não fósseis e não hidráulica (incluindo nuclear) somaram aproximadamente 14% da geração. Ou seja: além de manter a alta participação de biomassa na matriz energética em um país em desenvolvimento, com crescentes necessidades energéticas e oportunidades na exploração de petróleo, a bioenergia, e em particular o setor sucroenergético, deverá contribuir para preencher uma lacuna de quase 10% na geração de eletricidade.

Pouco mais de 11 meses depois da COP21, 55 países (representando pelo menos 55% das emissões mundiais), ratificaram o Acordo. O mesmo passou a vigorar oficialmente como um pacto global em novembro de 2016, com período de implementação se iniciando em 2020. Assim, as outrora “Pretendidas” Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC) deixam de ser uma intenção e passam a valer como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), devendo os países signatários desenvolver urgentemente mecanismos para sua efetiva implementação.

Histórico recente do etanol no Brasil

Uma diversidade de fatores favoreceu a adoção antecipada do etanol na matriz energética brasileira, enquanto a demanda por biocombustíveis manteve-se limitada durante muitos anos nos demais países. Até meados da primeira década de 2000, além

do posto de maior produtor mundial de etanol, o Brasil detinha o mais robusto programa de promoção de biocombustíveis conhecido até então (Prado Junior, 1967; Goldemberg et al., 2004; Leite e Cortez, 2008).

Mas na última década o setor sucroenergético alternou fases de expressivo crescimento (com o advento dos veículos flex e expansão do consumo interno), investimento e endividamento, seguido de frustração de expectativas tanto no mercado doméstico como no mercado internacional de etanol (Satolo e Bacchi, 2009; Bressan Filho, 2010; Santos et al. 2015; Rodrigues e Bacchi, 2016; EPE, 2016). As fases de expectativa e estagnação podem ser identificadas na Figura 1, em que é reportado o número de usinas implantadas, fechadas e reativadas em cada ano em um período de onze anos (2005-2015).

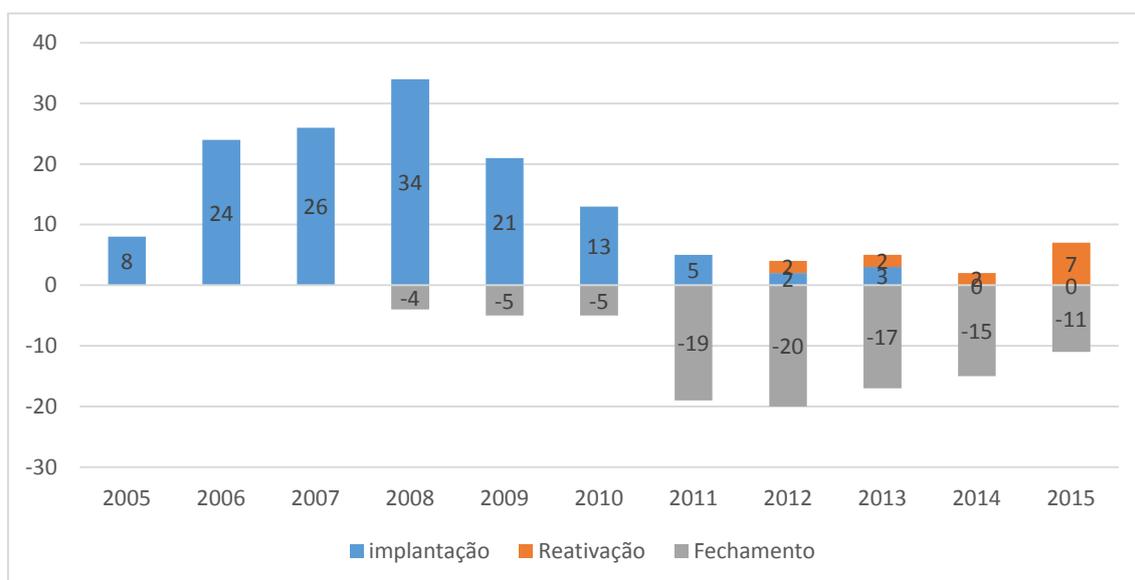


Figura 1: Fluxo histórico de unidades produtoras do setor sucroenergético entre 2005 e 2015 (número de unidades)

Fonte: EPE, 2016.

Entre 2005 e 2010 observa-se uma clara expansão do setor (com 34 novas unidades em 2008), que foi interrompida na virada da primeira década dos anos 2000. Em 2011, em uma conjuntura de baixa produtividade (fruto, entre outros fatores, de baixos investimentos nos canaviais), restrição de crédito, perspectivas negativas quanto à demanda interna e quanto à demanda externa de etanol, foram fechadas 19 unidades, tendo início uma fase de estagnação do setor.

Vale ressaltar a contribuição governamental para destruição de caixa do setor sucroenergético, da Petrobrás e das próprias contas públicas. Com objetivo de amenizar a aceleração do índice oficial de inflação (IPCA), o governo federal usou seu poder de decisão para manter o preço de realização da Petrobras em valores inferiores à sua aquisição, gerando importações de gasolina e prejuízos à empresa. Mais tarde, diante dos prejuízos e deterioração acelerada da rentabilidade e do valor de mercado da Petrobras, alguns reajustes marginais no preço de realização da gasolina foram implementados, porém seus efeitos foram contrabalanceados por redução de tributação sobre a gasolina, mantendo o preço constante aos olhos do consumidor (Babcok et al., 2013).

Do ponto de vista financeiro, a situação corrente do setor sucroenergético é de um elevado grau de endividamento, que já ultrapassa R\$ 130 bilhões, superando 120% do faturamento anual do setor (Globo Rural, 2016). A capacidade de tomada de crédito varia significativamente entre empresas, mas pelo menos 27 grupos empresariais do setor (representando 30% da moagem) encontram-se em alto grau de endividamento ou em recuperação judicial (Canaonline, 2016).

Por outro lado, alguns eventos notáveis que ocorreram no período de estagnação se contrapõem a um cenário tão sombrio.

Do ponto de vista tecnológico, deve-se reconhecer a transformação do perfil de produção do setor sucroenergético, com incorporação de vendas de bioeletricidade no conjunto de produtos comercializados pelas usinas. Adicionalmente, observou-se nesse período a inauguração de três unidades de produção de etanol de segunda geração (2G), sendo duas delas em escala comercial (EPE, 2015), para as quais se observa operação intermitente.¹

Do ponto de vista regulatório, foram observadas algumas ações que tendem a melhorar a rentabilidade do setor. Pode-se dar destaque a elevação do percentual de mistura do anidro na gasolina, de 20 para 25% em 2013, e de 25% para 27% em 2015; o retorno da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE) sobre a gasolina A em janeiro de 2015 (após anos de redução paulatina nos anos anteriores, chegando à zero em 2013); a manutenção de alíquota zero para o PIS/COFINS para o

¹ Essa transformação é detalhada nos capítulos 2 e 3 da presente tese.

etanol², e elevação da alíquota da gasolina de 0,26 para R\$ 0,38 por litro; e aumentos dos preços de realização da gasolina entre 2013 e 2015 (EPE, 2016).

Por fim, a menção específica aos biocombustíveis na iNDC brasileira (Brasil, 2015), e a ratificação do acordo em 2016, indicam uma abordagem mais cuidadosa e consistente para energias renováveis no Brasil, no longo prazo.

A necessidade de abordagens sistêmicas na análise de biocombustíveis

Embora biocombustíveis emitam quantidades não negligíveis de GEE (particularmente CO₂) em seu processo de combustão, o carbono de sua composição é absorvido da atmosfera no processo de crescimento das plantas (que serão processadas e transformadas em combustíveis). Convenciona-se que a emissão de CO₂ de biocombustíveis, por ser biogênico, tem efeito neutro (emissão zero) no que diz respeito à concentração de CO₂eq na atmosfera e efeitos climáticos derivados. Dessa maneira, a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis reduz as emissões em praticamente 100% na fase de combustão (uso final).

Como o processo de produção de biocombustíveis (plantio, colheita, transporte e processamento) utiliza combustíveis fósseis e outros materiais (fertilizantes, químicos, etc.) que geram emissões de GEE não compensadas pela absorção de carbono por fotossíntese no crescimento das plantas, a substituição de fóssil por bio gera reduções geralmente menores que 100%. Já existe relativo consenso quanto às etapas produtivas listadas acima (que resultam as comumente chamadas emissões diretas) a respeito das abordagens metodológicas na avaliação das emissões, e até alguma consolidação na literatura internacional quanto à redução de emissões de GEE, dependendo da rota tecnológica selecionada (IEA, 2004; Macedo, 2005; IPCC, 2007). O mesmo não pode ser dito quanto à análise quando são incorporados também os efeitos indiretos dos biocombustíveis (IPCC, 2014; Souza et al., 2015).

² O PIS/COFINS deverá voltar para R\$ 0,12 em janeiro de 2017, de acordo com Lei 12.995/2014 (Brasil, 2014).

O conceito de “mudança de uso da terra” - originalmente formulado como *Land Use Change* (LUC) na terminologia anglo-saxônica -, estabelece que o cálculo de pegada de carbono (do Inglês, *carbon footprint*) dos biocombustíveis³ não deve se limitar às etapas produtivas dos biocombustíveis. Pelo conceito deve-se também considerar as emissões de mudança de uso da terra causadas pela conversão de áreas antes destinadas a outros fins, para a produção de biocombustíveis. Tal conceito é plenamente alinhado com abordagens de medição de pegada de carbono.

Com base em modelagem de ciclo de carbono, cientistas alertam que a produção de biocombustíveis a partir de insumos de baixa performance, em locais de altos estoques de carbono, pode emitir mais GEEs que o biocombustível irá mitigar substituindo combustível fóssil (Tilman et al., 2006; Riguelato e Spracklen, 2007). Fargione et al. (2008) alertam que o potencial de mitigação dos biocombustíveis depende de onde são produzidos. A conversão de florestas, turfeiras e savanas em áreas de commodities agrícolas, para produção de biocombustíveis, pode levar a uma “dívida” de carbono. Segundo os autores, por exemplo, a conversão de cerrado para produção de etanol de cana-de-açúcar levaria a uma emissão inicial de GEE 17 vezes maior que o montante de GEE poupado anualmente pelo biocombustível, em função da substituição da gasolina. No caso da conversão de áreas de pradarias para plantio de milho, nos EUA, o resultado seria uma dívida 98 vezes maior que o montante anual poupado pelo consumo de etanol de milho.

Em artigo de grande impacto internacional, Searchinger et al. (2008a) acoplam a modelagem econômica aos modelos de ciclo de carbono e contestam a contribuição ambiental de diversos biocombustíveis, mesmo que os insumos jamais venham a converter diretamente áreas de vegetação natural. O racional que viria a ser conhecido como mudança indireta do uso da terra (iLUC), considera que o efeito da mudança de uso da terra causada pela produção de biocombustíveis não se restringe à área efetivamente substituída pelo insumo usado para produção do biocombustível. Ao serem consideradas as emissões devido ao iLUC, o etanol de milho aumentaria as emissões de GEE em 50% quando da substituição da gasolina (ao invés de reduzir emissões em 20%).

³ O objetivo é avaliar as emissões de GEE, em geral expressas em CO₂eq, considerado o ciclo de vida do biocombustível.

A abstração do conceito do iLUC leva ao entendimento de que se o plantio do insumo do biocombustível deslocou uma determinada atividade, em um local, as forças de mercado (regidas por oferta e demanda) levarão a que essa perda de área seja compensada em outro lugar. Ao se tratar de commodities agrícolas, as forças de mercado internacionais fazem com que o efeito indireto possa ocorrer em áreas muito distantes, inclusive em outros continentes.

Com a difusão do conceito de iLUC, somado à controvérsia alimentos versus biocombustíveis (*food vs fuel*), as comunidades civil e científica internacional entraram em intensos debates, gerando antagonismos entre grupos a favor e contra os biocombustíveis (Wang, 2008; Kline e Dale, 2008; Searchinger, 2008b). Embora haja reconhecimento que o iLUC jamais poderia ser efetivamente mensurado, tal conceito teve enorme repercussão internacional no mundo científico e acadêmico, além de suscitar relevantes questionamentos sobre a contribuição ambiental de todas as rotas de produção de biocombustíveis, independente delas estarem fisicamente próximas ou não de áreas de vegetação natural suscetíveis de impacto.

A difusão do conceito de iLUC ocorreu no momento em que as principais regiões consumidoras de combustíveis fósseis iniciavam a adoção de políticas de substituição de gasolina e diesel por biocombustíveis. Ainda que a ciência não fosse capaz de contemplar o rigor necessário para tais avaliações, os legisladores dos EUA e da União Europeia, pressionados por setores específicos da sociedade civil, exigiram que as políticas internas referentes aos biocombustíveis obrigatoriamente considerassem o iLUC em sua formulação. Tal necessidade ficou particularmente evidente na legislação federal de combustíveis dos EUA (USEPA, 2009), na legislação estadual da Califórnia (CARB, 2009a) e nas legislações da União Europeia (EU, 2009a; EU, 2009b).

Relatórios mais recentes do IPCC (2014) já refletem o reconhecimento de que o iLUC foi inicialmente sobrestimado, embora ainda haja grande variação de resultados. A expansão de bioenergia tem potencial significativo para a mitigação das mudanças climáticas, mas os resultados dependem (i) da tecnologia utilizada; (ii) do uso da terra anterior e respectivo estoque de carbono (por exemplo, em florestas, pastagens, áreas marginais); (iii) da escala de produção; e (iv) da fonte de matéria-prima. O mesmo relatório sugere que a pesquisa e o desenvolvimento de metodologias capazes de avaliar corretamente os efeitos diretos e indiretos do uso da terra devem facilitar a compreensão

da efetiva contribuição dos biocombustíveis, assim como devem disponibilizar ferramentas para mitigar o risco de iLUC dos biocombustíveis.

Assim, com o debate acerca das reais contribuições dos biocombustíveis para a redução das emissões de GEE, e com a adoção de políticas que condicionaram a produção, criou-se um vínculo irrevogável entre política climática, política energética e uso da terra.

Objetivo

A presente tese tem como objetivo principal avaliar de maneira sistêmica a contribuição do setor sucroenergético no combate às mudanças do clima no Brasil, consideradas as produções de etanol e de bioeletricidade, combinando ferramentas de planejamento energético, análise de ciclo de vida e modelagem de uso da terra. Para atingir o objetivo principal foi necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Aprimorar a sessão de bioenergia do Modelo de Uso da Terra para Agricultura Brasileira (BLUM), incorporando rotas tecnológicas e melhorando o módulo de consumo de combustíveis da frota de veículos do ciclo Otto;
- Simular cenários de introdução de (i) sistemas de alta eficiência em cogeração; (ii) uso da palha da cana-de-açúcar para geração de bioeletricidade; (iii) produção de etanol 2G e (iv) políticas de precificação de carbono na gasolina - avaliando seus impactos nos níveis de atividade do setor sucroenergético, e incluindo na análise seus principais efeitos indiretos.
- Analisar os resultados dos cenários, combinando indicadores de planejamento energético (produção e consumo de biocombustíveis e bioeletricidade, etc.), uso da terra e pegada de carbono.

Estrutura da tese

Buscando maior eficiência e repercussão da pesquisa, optou-se por uma estrutura de tese que incorpora dois artigos que serão submetidos para periódicos científicos.

Após a Introdução geral e apresentação dos objetivos, o Capítulo 1 detalha a metodologia desenvolvida ao longo da tese, e que foi utilizada nos dois capítulos seguintes. A principal contribuição metodológica foi o aprimoramento do modelo BLUM, e a apresentação do modelo e das melhorias é feita no contexto da análise dos modelos econômicos que tratam do uso e da mudança do uso da terra. Os Capítulos 2 e 3 foram estruturados no formato de artigos científicos e trazem exemplos de aplicações práticas da metodologia desenvolvida. O Capítulo 2 trata da diversificação da produção no setor sucroenergético, com a geração de bioeletricidade em larga escala, incluindo uma apresentação de sua evolução recente, análises prospectivas dos efeitos marginais e cumulativos de políticas de precificação de bioeletricidade e desenvolvimento tecnológico. O artigo está em versão adiantada, redigido na língua inglesa e deverá ser submetido para periódico após comentários da banca de defesa. Além dos resultados em si, a submissão tem como objetivo e desafio referenciar a metodologia baseada no modelo BLUM dentre periódicos “*blind review*”. Entende-se antecipadamente que trechos do Capítulo 1 deverão ser incorporados no material suplementar para a submissão. Tendo conhecimento dos resultados do Capítulo 1 e 2, o Capítulo 3 trata da incorporação do Custo Social do Carbono na precificação da gasolina, do desenvolvimento da tecnologia 2G, além do emprego em larga escala da tecnologia de bioeletricidade, estudada no Capítulo 2. Diferentemente do Capítulo 2, o foco principal é nos resultados e o texto ainda deverá ser vertido para língua inglesa. No quarto e último capítulo é feita a análise crítica dos diferentes resultados obtidos ao longo da tese, além de serem feitas recomendações de políticas para que as metas de redução de emissões de GEE possam ser alcançadas. Também são apresentadas sugestões de pesquisa adicional.

Referências da introdução

ADAMS, D. M., ALIG, R. J., CALLAWAY, J. M., WINNETT, S. M., e MCCARL, B. A.. **The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): model structure and policy applications**. DIANE Publishing. 1996

ASSAD, EDUARDO; PINTO, HILTON S.; NASSAR, ANDRE; HARFUCH, LEILA; FREITAS, SAULO; FARINELLI, BARBARA; LUNDELL, MARK; FERNANDES, ERICK C.M.. **Impacts of Climate Change on Brazilian Agriculture**. World Bank, Washington, DC. World Bank. 2013
openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18740 License: CC BY 3.0 IGO.

BABCOCK, BRUCE A., MOREIRA, MARCELO, YIXING PENG **Biofuel taxes, subsidies, and mandates: impacts on US and brazilian markets**. Fapri Staff Report 13-SR 108. 2013. Disponível em <http://www.card.iastate.edu/products/publications/pdf/13sr108.pdf>. Acesso novembro 2016.

BRASIL. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. 2015. Disponível em http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. Acesso em Dezembro 2016.

BRASIL. **LEI Nº 12.995, DE 18 DE JUNHO DE 2014**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/Lei/L12995.htm

BRESSAN FILHO, A.. **Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil**. Superintendência de Informações do Agronegócio, CONAB, 87, 2010

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report. Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard**. 2009a. Volume I. Disponível em <https://www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf> Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Board Meeting Comments**., 2009b. Disponível em <https://www.arb.ca.gov/lispub/comm/bccommlog.php?listname=lcfs09>. Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report: initial statement of reasons for rulemaking: proposed re-adoption of the Low Carbon Fuel Standard regulation**, 2015. Disponível em www.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15isor.pdf. Acesso em novembro 2016.

CANA ONLINE. **Alavancagem média do setor de cana deve crescer 9% em 2015/16, diz Figliolino**. Publicado em 30 julho 2016. Disponível em

www.canaonline.com.br/conteudo/alavancagem-media-do-setor-de-cana-deve-crescer-em201516-diz-figliolino.html#.WBpXWi0rKUK. Acesso em novembro de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, M. M. E.. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto**. EPE-DPG-SGB-Bios-NT-02-2016. Rio de Janeiro. 2016

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA **Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program**. EPA-420-D-09-001. 2009.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. Renewable energy directive. 2009a. disponível em <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>. Acesso dez 2016.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. Fuel Quality Directive. 2009b. disponível em <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/fuel.htm>. Acesso dez 2016.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. **Commission staff working document - impact assessment**. Brussels. 2012. Disponível em https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/swd_2012_0343_ia_en.pdf. Acesso em nov. 2016.

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., POLASKY, S., e HAWTHORNE, P. **Land clearing and the biofuel carbon debt**. Science, 319(5867), 1235-1238., 2008

FARINA E PHILIPS, 2014b. **UNICA’s Comments on the Updated Indirect Land Use Change Analysis of the Low Carbon Fuel Standard**. 2014b. Disponível em http://sugarcane.org/resource-library/Unica%20comments%20to%20CARB%20iLUC_values%20-%20October%202014.pdf. Acesso em 2016.

FARINA, ELIZABETH; PHILIPS, LETICIA. **UNICA’s Preliminary Comments on Revised Indirect Land Use Change Values**. 2014a disponível em: <http://sugarcane.org/resource-library/UNICA%20LCFS%20iLUC%20revision%20Final.pdf> . Acesso em 2016.

FOOD AND AGRICULTURAL POLICY RESEARCH INSTITUTE – FAPRI. **About FAPRI**. 2016. Disponível em <http://www.fapri.iastate.edu/about.aspx>

FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - FBMC. **IES-Brasil: Cenários de Mitigação**. 2015. Disponível em <http://www.forumclima.org.br/pt/ies-brasil/sobre>. Acesso em out 2016.

FRITSCHÉ, U. AND K. WIEGMANN. **Indirect Land Use Change and Biofuels**. Darmstadt, Germany, Oeko-Institut, Energy e Climate Division., 2011

GLOBAL TRADE ANALYSIS PROJECT – GTAP. **About GTAP**, 2016 disponível em <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>. Acesso em 2016.

GLOBO RURAL. Cana-de-açúcar: **Globo Rural faz balanço da crise do setor**. Edição do dia 05/06/2016. Disponível em <http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2016/06/cana-de-acucar-globo-rural-faz-balanco-da-crise-do-setor.html>. Acesso em dezembro 2016.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., NASTARI, P. M., & LUCON, O.. **Ethanol learning curve—the Brazilian experience**. *Biomass and Bioenergy*, 26(3), 301-304. 2004

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for Policymakers**. In: *Climate Change 2014: Mitigation of 372 Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of 373 the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC: **Summary for Policymakers**. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (org.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Biofuels for Transport: an international perspective**. Paris: Chirat, 2004.

KLINE, K. L., e DALE, V. H. **Biofuels: effects on land and fire**. *Science*, 321(5886), 199-201, 2008.

LEITE, ROGÉRIO CERQUEIRA; CORTEZ, LUÍS AUGUSTO B. **O etanol combustível no Brasil**. *Revista Biocombustíveis no Brasil: Realidades e Perspectivas*, Ministério das Relações Exteriores, 2008.

MACEDO, ISAIAS CARVALHO DE (org.). **A energia da cana-de-açúcar doze estudos 384 sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. São Paulo: 385 Berlendis & Vertechia. 237p., 2005.

PRADO JÚNIOR, CAIO. **Formação econômica do Brasil**. São Paulo: Brasiliense, 1967.

RIGHELATO, R., e SPRACKLEN, D. V.. **Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests?**. *Science*. 2007

RODRIGUES, L., e BACCHI, M. R. P.. **Light fuel demand and public policies in Brazil, 2003–2013**. *Applied Economics*, 1-14. 2016

SANTOS, G. R. D., GARCIA, E. A., E SHIKIDA, P. F. A.. **A Crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas**. 2015 http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/radar/150630_radar_39_cap3.pdf.

SATOLO, LUIZ FERNANDO; BACCHI, MIRIAN RUMENOS PIEDADE. **Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar.** Economia Aplicada, v. 13, n. 3, p. 377-397, 2009.

SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., YU, T. H.. **Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change.** Science,319(5867), 1238-1240. 2008a

SEARCHINGER, T.. **E-letter response to M. Wang and Z. Haq's E-letter: ethanol's effects on greenhouse gas emissions.** Science, 319, 5867. 2008

SOUZA, MENDES, G.; VICTORIA, R. JOLY., C. VERDADE, L (org). **Bioenergy & sustainability: Bridging the gaps.** SCOPE. FAPESP. 2015.

TILMAN, D., HILL, J., e LEHMAN, C.. **Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass.** Science, 314(5805), 1598-1600. 2006.

UNITED NATIONS – UN. **Paris Agreement.** 2015. Disponível em unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf. Acesso em dezembro 2016.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Draft Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.** EPA-420-R-10-006. 2009.

WANG, M.. **E-letter: ethanol's effects on greenhouse gas emissions.** Science, 319, 5867. 2008.

1 MODELOS DE USO DA TERRA

1.1 Revisão dos modelos de uso da terra

Como exposto na introdução, apesar de inicialmente ter sido notadamente sobrestimado, a necessidade de mensuração do iLUC criou um vínculo irrevogável entre políticas climáticas, políticas energéticas e uso da terra. Os trechos a seguir são uma síntese de Moreira et al. (2012) a respeito do tema, tendo sido o texto atualizado e completado quando necessário.

Dada sua abstração teórica, o iLUC não pode ser mensurado para uma mudança já ocorrida do uso da terra, tampouco seus efeitos podem ser efetivamente quantificados ou previstos (Nassar et al., 2011a; *EU Commission*, 2012; Valin et al., 2015). Embora avaliações tenham sido feitas a partir de dados históricos (Fritsche et al., 2011, Moreira et al., 2012) ou via simples projeções (Lapola et al., 2010), a abordagem consequential baseada na identificação de efeitos marginais de expansão de biocombustíveis é a mais indicada para isolar e compreender os efeitos do iLUC (USEPA, 2010; CARB, 2015; Valin et al., 2015). Convencionou-se assim a seguinte abordagem:

- (i) Projeta-se um cenário referência;
- (ii) É considerada uma mudança (política, tecnológica, de padrão de consumo, entre outros possíveis aspectos) no cenário referência (choque exógeno), que leve à expansão de consumo e/ou produção de biocombustíveis;
- (iii) Comparam-se as emissões de GEE por mudança de uso da terra entre os cenários;
- (iv) A diferença em emissões de GEE entre os cenários é associada ao consumo adicional de biocombustíveis.⁴

Na maioria dos casos convencionou-se medir o iLUC em $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ (aplicando-se ajustes temporais), de maneira que essa unidade possa ser somada à

⁴ Não existe, assim, um valor único para as emissões indiretas, mas um valor para cada caso em estudo.

pegada de carbono da produção agrícola e industrial do biocombustível, e comparada com a emissão do ciclo de vida da gasolina.

Até o momento não foram apresentadas metodologias específicas para o tratamento de questões relativas ao iLUC. Pelo contrário, os esforços de pesquisa têm sido direcionados ao preenchimento das lacunas para adaptar metodologias robustas já existentes, utilizadas em diferentes áreas da ciência. De modo geral, os esforços estiveram voltados à combinação de modelos socioeconômicos e biofísicos.⁵

Dos modelos socioeconômicos são extraídas as projeções e simulações de tendências de produção, consumo e uso da terra, dos quais as alterações do ambiente são determinadas pelas decisões do indivíduo. Esses modelos tratam geralmente de áreas geográficas extensas, como estados, regiões, países ou grupos de países.

Modelos de projeção de oferta e da demanda agrícola já são utilizados há décadas, com grande impacto na tomada de decisão dos agentes do setor privado, assim como dos formuladores de políticas públicas (Kastens et al., 1998; Irwin et al., 2001). A necessidade de melhor compreender os grandes movimentos de uma economia, cada vez mais integrada, aliados ao incremento de capacidade de processamento computacional, levou ao desenvolvimento e ao uso de modelos de simulação mais complexos e projeção de longo prazo.

Os modelos econômicos de equilíbrio parcial e de equilíbrio geral, estruturados na simultaneidade de equilíbrios, vão além de tendências estatísticas e permitem avaliar impactos diretos e indiretos de políticas e tendências em diferentes mercados. Como veremos mais a frente, modelos com início de desenvolvimento nas décadas de 1980 e 1990, com foco em políticas agrícolas, comércio internacional, preços e produção, tiveram grande influência na determinação das características ambientais das atuais políticas de biocombustíveis.

Nos modelos biofísicos, a análise concentra-se nas características físicas e geográficas, e a interferência humana é geralmente exógena. Em geral, tais modelos são utilizados em áreas geográficas menores e o pixel passou a predominar como unidade de análise nos modelos mais modernos (Soares Filho et al., 2006; Lapola et al., 2010). De acordo com Nassar et al. (2011a), modelos biofísicos devem ser utilizados para o

⁵ Uma síntese dos principais esforços na integração de modelo econômicos e biofísicos pode ser encontrada em Veldkamp e Verburg (2004). Na data de edição dessa publicação, porém, o conceito de iLUC ainda não estava claro.

aprimoramento do cálculo de iLUC, por meio de (i) a utilização de imagens de satélite e mapas para a determinação da cobertura vegetal, observação de padrões de mudança de uso da terra (direta), produtividade agrícola potencial, cálculo de estoques de carbono e; (ii) modelos espacialmente explícitos para alocar os resultados das projeções socioeconômicas.

As inúmeras combinações dos diversos modelos econômicos e biofísicos existentes geram um número demasiadamente grande de possíveis metodologias de análise de iLUC para ser tratado no escopo do presente estudo. Dessa forma, aqui são revisadas apenas as metodologias utilizadas nas principais legislações de biocombustíveis, a saber: legislação federal americana (*Renewable Fuel Standard 2 – RFS2*), legislação do estado da Califórnia (*Low Carbon Fuel Standard – LCFS*) e nas principais legislações europeias (*Renewable Energy Directive e Fuel Quality Directive – RED/FQD*).

No LCFS, foram utilizadas combinações de versões do modelo *Global Trade Analysis Project* (GTAP) e mapas de estoque de carbono. Um primeiro conjunto de resultados foi apresentado em 2009 (CARB, 2009a). Os resultados socioeconômicos gerados para as 111 regiões globais do GTAP (versão GTAP-Bio) foram distribuídos entre as 18 *Agro-Ecological Zones* (AEZ), sendo essa a principal adaptação do GTAP para análises de uso da terra.

As AEZs, definidas pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e pelo *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA), são regiões que combinam características (como precipitação, temperatura, tipo de solo e rugosidade), resultando em áreas com restrições de uso e acesso similares. Quando combinadas com estimativas de fluxos de carbono e padrões detalhados de mudança de uso da terra, além do tipo de mudança de uso da terra em cada AEZ, resulta em um fator de emissão absorção de carbono (tonelada CO₂eq /ha/ ano) específico (Lee, 2005; CARB, 2009a).

Cada região do GTAP é inserida em pelo menos uma AEZ. A emissão de GEE é calculada pela multiplicação de uma aproximação de estimativa de mudança de uso da terra (derivada dos resultados do GTAP) pelos fatores de conversão entre usos da terra em cada uma das AEZs (dados tabulares).

O GTAP, desenvolvido pela Universidade de Purdue, nos Estados Unidos, foi originalmente concebido para análises de comércio internacional. Por se tratar de um modelo de equilíbrio geral computável, a oferta, a demanda e a renda são determinadas simultaneamente, e diferentes equilíbrios são encontrados. As principais vantagens são a grande cobertura de países e setores, além de ser um modelo bastante conhecido e desenvolvido por diversos colaboradores. No GTAP, a convergência de um equilíbrio para outro não é necessariamente intuitiva, porém não há interesse dentro do LCFS em identificar a sequência temporal entre dois equilíbrios. Nela, a demanda por terra é inferida por funções de substituição entre fatores de produção.

Embora se reconheça o esforço em prol da transparência na elaboração da primeira versão da proposta de legislação (CARB, 2009a), a primeira abordagem para o tema foi preocupante. Por exemplo, diversos índices e parâmetros no GTAP, e até mesmo estruturas produtivas, eram inadequados para a realidade da dinâmica do uso do solo no Brasil.

Centenas de cartas com críticas e recomendações foram endereçadas aos reguladores americanos, grande parte delas contendo comentários ao iLUC (CARB, 2009b). No que diz respeito ao etanol de cana-de-açúcar, destaca-se carta de pesquisadores brasileiros, compilada pela União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA) (Jank e Velasco, 2009). A carta cita a inadequação de modelos de equilíbrio geral para obtenção de valores pontuais e precisos; questões relativas ao tamanho do choque aplicado; subdimensionamento da capacidade de intensificação da pecuária no Brasil; elasticidades incorretas; cenários mal dimensionados e desiguais para os casos estudados; produtividade desatualizada para cana-de-açúcar; estoques de biomassa imprecisos para o Brasil; e fatores de emissão incorretos para a cana-de-açúcar.

Após receber diversas sugestões, dados e publicações, o CARB montou um grupo de especialistas que ficou responsável por revisar a modelagem. Diversas melhorias foram implementadas na revisão da regulamentação, concluída em 2015. Uma nova versão do modelo GTAP-Bio, com estrutura de competição entre usos da terra mais adequada a análises de desmatamento, e um modelo muito mais detalhado para conversão de mudança de uso do solo em emissões de GEE foram os principais destaques (Plevin, 2011; Taheripour e Tyner, 2013; Farina e Philips, 2014a; Farina e Philips, 2014b; CARB, 2015).

Embora os valores finais para estimativa de iLUC tenham melhorado significativamente, ainda pesam dificuldades em pontos específicos nos quais a modelagem de equilíbrio geral esbarra em limitações estruturais. Tais limitações dizem respeito essencialmente à dificuldade de incorporar observações reais (i.e., padrão de uso da terra via imagens de satélite) adequadas a características regionais no Brasil; identificar e simular a efetiva mudança de uso da terra (substituição efetiva entre usos, e não montantes de uso da terra resultante); uma correta interpretação da dinâmica da pecuária (níveis tecnológicos, sistemas de produção e sistemas regionais); evolução da tecnologia de 2ª e 3ª safra e incorporação de sua dinâmica; considerar novas tecnologias na indústria da cana-de-açúcar; além de considerar coeficientes mais precisos de emissão de GEE associados ao uso da terra.

Na proposta de legislação do RFS, a EPA combinou a análise de uso da terra, desenvolvida pelo sistema de modelos globais do *Food and Agricultural Policy Research Institute* (FAPRI), do *Center for Agricultural and Rural Development* (CARD), e pelo modelo *Forestry Agriculture Sector Optimization Model* (FASOM), da Universidade Texas AM, com as análises de imagens de satélite e dados georreferenciados disponibilizados pela Winrock International (USEPA, 2009).

O sistema de modelos FAPRI é uma combinação de modelos de equilíbrio de oferta e demanda, cujo objetivo é projetar consumo, produção e comércio internacional de produtos agrícolas (FAPRI, 2016). Embora seu objetivo inicial não fosse analisar o uso da terra, a competição por terra entre lavouras é explicitamente modelada nos principais mercados, por meio de matrizes de competição por área que respondem à rentabilidade. O FASOM é um modelo de otimização e seu objetivo original é a realização de análises agrícolas e ambientais contidas dentro dos limites geográficos dos EUA (Adams et al., 1996; USEPA, 2009).

Assim como para o LCFS, a primeira proposta de regulação, publicada pelo EPA no *Draft Regulatory Impact Analysis* (DRIA) em maio de 2009 (USEPA, 2009), apresentava diversas dificuldades em capturar as características de uso da terra no Brasil. Em particular:

- A análise era demasiadamente agregada (o Brasil era tratado como uma única região);
- As áreas de pastagens não eram modeladas seguindo hipóteses econômicas;

- A capacidade de intensificação da pecuária não foi devidamente considerada e;
- A análise de imagens de satélite não tem a precisão adequada para diferenciar as áreas de pastagens e vegetação nativa em alguns biomas brasileiros.

No período de consulta pública referente, diversas melhorias já haviam sido incorporadas no BLUM, tornando possível elaborar propostas construtivas e implementar melhorias na metodologia preliminar proposta pela EPA. A análise de mudança de uso da terra proposta no texto original foi refeita utilizando o BLUM, desagregando o Brasil em seis regiões e incorporando análise de mudança de uso da terra substancialmente mais completa que a do texto original (Nassar et al., 2009). Os resultados obtidos no BLUM indicaram existência de efeito indireto da expansão de consumo e da produção de etanol de cana-de-açúcar, porém marginal e significativamente inferior aos resultados originalmente propostos no DRIA.

A colaboração entre ICONE e FAPRI/CARD levou à incorporação do BLUM ao sistema FAPRI, com resultados de grande relevância para o etanol de cana-de-açúcar (USEPA, 2010). Uma exposição mais completa do BLUM e de seus principais desenvolvimentos após a regulamentação pela EPA é feita na seção 1.2.

Diferentemente do caso norte americano, a União Europeia (UE) não adotou um procedimento único para estimativa de iLUC. O bloco preferiu trabalhar com o Princípio de Precaução, pelo qual o “risco” de iLUC é avaliado por meio de uma diversidade de metodologias e revisões metodológicas, coordenadas pelo Joint Research Center (JRC), da UE. O texto atual da RED-FQD reporta valores obtidos pelo modelo MIRAGE, elaborados pelo consórcio ATLASS (Laborde, 2011; European Commission, 2012).

O MIRAGE é um esforço conjunto do *Centre D' Études Prospectives et d'Informations Internationales* (CEPPI) e do *International Food Policy Research Institute* (IFPRI). O MIRAGE é um modelo de equilíbrio geral, desenvolvido a partir do GTAP7. A melhoria da base de dados para o setor de biocombustíveis, as estimativas de funções de produção adequadas ao setor agrícola, o desenvolvimento do módulo de energia e a decomposição adequada e a incorporação da dinâmica de uso da terra são as principais adaptações para as análises de iLUC. As limitações do MIRAGE se assemelham às demais abordagens de equilíbrio geral.

Não há, portanto, um modelo completo e ideal para todos os usos. Cada modelo tem suas vantagens. A decisão do modelo mais adequado a ser utilizado geralmente leva a escolhas entre precisão, coerência, e abrangência dos resultados.

1.2 O modelo BLUM

1.2.1 Visão geral⁶

BLUM é um modelo econômico dinâmico de equilíbrio parcial, multirregional e multimercado para o setor agropecuário brasileiro, e composto por dois módulos: oferta e demanda, e uso da terra. O modelo, desenvolvido em parceria pelos pesquisadores da Agroicone e do FAPRI/CARD da Universidade de Iowa, e aprimorado com a colaboração de outras instituições (CTBE, LAPIG, ESALQ, CGEE), é reconhecido internacionalmente como referência para análises e projeções de longo prazo do uso da terra para o Brasil.

Quando utilizado em versão integrada, o modelo foi fundamental na regulamentação do etanol de cana-de-açúcar no âmbito do *Renewable Fuel Standard 2* (US-EPA, 2010). Sua versão *stand-alone* tem sido aprimorada por meio de diversas parcerias, e tem sido amplamente utilizada por bancos de desenvolvimento, governos, fundações de pesquisa e outras parcerias acadêmicas para estudos prospectivos com foco na agricultura brasileira, tendo particular impacto nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças do clima (De Gouvello, 2010; Nassar et al., 2011b; Assad et al., 2013). O modelo foi recentemente utilizado como ferramenta quantitativa para fundamentar a proposta iNDC levada pelo governo brasileiro para a COP21 (MMA, 2016; La Rovère et al., 2016).

⁶ O texto tem como base Moreira et al. (2016), sendo complementado e atualizado quando necessário.

O modelo inclui os seguintes produtos: soja, milho e feijão (primeira e segunda safras), algodão, arroz, cana-de-açúcar, trigo, cevada, pecuária de leite e de corte, carnes bovina, suína e de frango, e ovos. A floresta comercial e o dendê são considerados como projeções exógenas no modelo. Combinadas, essas atividades foram responsáveis por 95% da área total utilizada para a produção agropecuária em 2015.

As “safrinhas”, ou culturas de inverno, como milho, feijão, cevada e trigo não geram demanda adicional por terra por serem plantadas após uma cultura principal de primeira safra (ou safra de verão). No entanto, a produção dessas safras é contabilizada na oferta nacional de cada uma das lavouras.

Os principais aspectos diferenciais do modelo BLUM em relação aos modelos que anteriormente foram empregados na análise do caso brasileiro, são:

- Maior detalhamento dos setores agro (i.e., das funções de produção);
- Representação endógena dos sistemas de produção de segunda safra;
- Representação de três níveis tecnológicos da pecuária bovina com migração endógena entre sistemas;
- Desenvolvimento de modelo teórico de uso da terra capaz de identificar substituição ente usos (elasticidade substituição e expansão complementares);
- Uso de Sistema de Informação Georreferenciada na calibração das elasticidades consideradas na competição e na expansão;
- Detalhamento regional do perfil tecnológico do setor sucroenergético e capacidade de incorporação de rotas tecnológicas inovadoras.

1.2.2 Módulo de oferta e demanda

No módulo de oferta e demanda, a demanda total de uma atividade é projetada nacionalmente e é definida pela demanda doméstica, exportações líquidas (exportações menos importações) e estoques finais (os quais não são considerados para pecuária, carnes e cana-de-açúcar), e responde a preços e a variáveis exógenas (como Produto Interno Bruto - PIB, população, taxa de câmbio, entre outras).

A oferta é definida pela produção nacional (a qual é projetada regionalmente) e pelos estoques iniciais (novamente considerados apenas para grãos e seus complexos, açúcar e etanol), e os dois parâmetros respondem às rentabilidades de cada commodity, as quais dependem de custos, preços e produtividades.

A área total alocada para agricultura e pecuária é calculada para seis regiões do país⁷, como mostra a Figura 2:

- Sul (estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul);
- Sudeste (estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, e Minas Gerais);
- Centro-Oeste Cerrado (estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e a parte do estado do Mato Grosso que está dentro dos biomas Cerrado e Pantanal);
- Norte Amazônia (a parte do estado do Mato Grosso dentro do bioma Amazônia, Amazonas, Pará, Acre, Amapá, Rondônia e Roraima);
- Nordeste Litorâneo (Alagoas, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe);
- Nordeste Cerrado (Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia).

Oferta e demanda nacional, bem como o uso da terra regional, respondem a preços. Consequentemente, para um dado ano, o equilíbrio é obtido quando se encontra um vetor de preços que simultaneamente equilibra todos os mercados. Ano a ano uma sequência de vetores de preços é estimada, permitindo avaliar a trajetória dos mercados ao longo do tempo. Os resultados do modelo são: uso da terra regional, produção nacional e regional, preços, consumo e exportações líquidas.

⁷ As regiões foram definidas considerando a homogeneidade da produção agrícola e a divisão dos biomas.



Figura 2: Regiões consideradas no modelo BLUM

Fonte: Agroicone.

A área alocada para cada região no módulo de uso da terra é parte da oferta no módulo de oferta e demanda, garantindo a interação entre esses dois módulos e que a seguinte identidade seja satisfeita:

“Estoque inicial + Produção + Importações = Estoque final + Consumo + Exportações”

Ou, considerando que “Exportações líquidas = Exportações – Importações”:

“Estoque inicial + Produção = Estoque final + Consumo + Exportações líquidas”

O BLUM também considera as interações entre os setores analisados, assim como entre um produto e seus subprodutos. Por exemplo, a relação entre os grãos e a pecuária ocorre a partir do consumo de ração (basicamente milho e farelo de soja), que é função da oferta de carnes, leite e ovos, sendo um componente da demanda doméstica de milho e soja. No caso do complexo de soja, as demandas de farelo e de óleo de soja são parte da demanda doméstica de soja em grão e são determinados pela demanda por

esmagamento. Similarmente, açúcar e etanol são componentes da demanda por cana-de-açúcar (vide Figura 3).

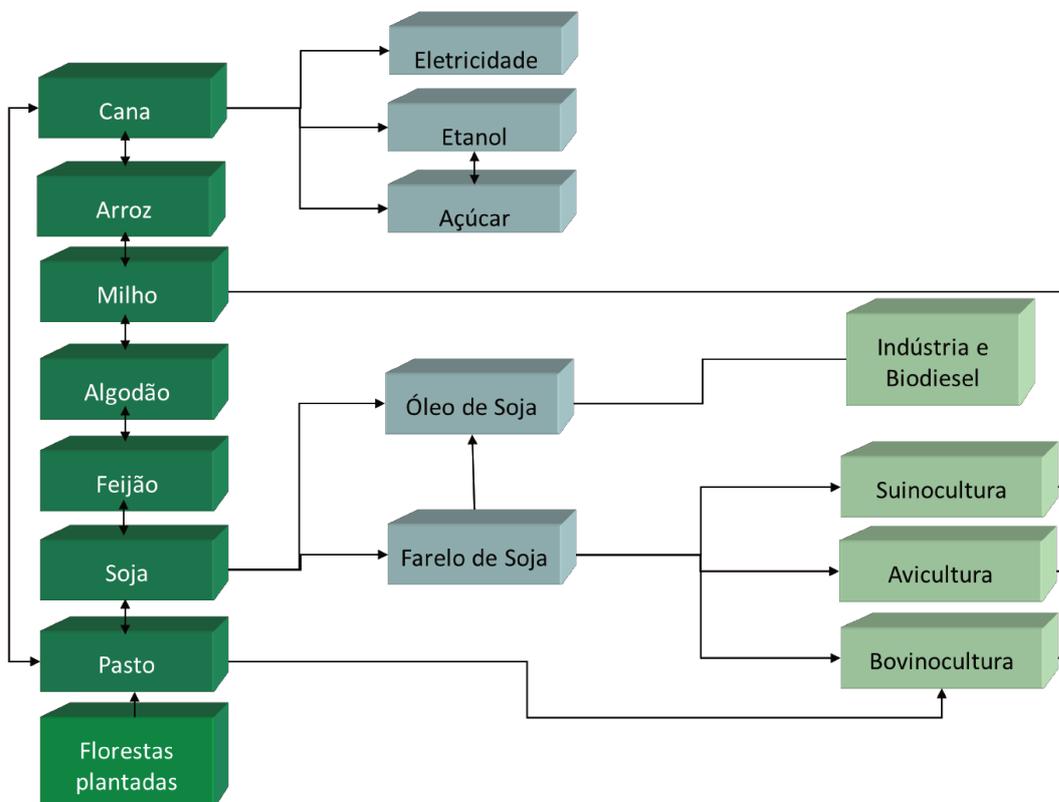


Figura 3: Interações entre os produtos e setores no BLUM

Fonte: Agroicone.

1.2.3 Módulo de Uso da Terra

Dois efeitos são considerados para tratar a dinâmica do uso da terra: competição e escala. Intuitivamente, o efeito competição representa como as diferentes atividades agropecuárias competem por uma dada quantidade de terra arável, disponível. O efeito escala se refere à maneira pela qual a competição entre as diferentes atividades gera uma necessidade adicional por terra. Esta necessidade é acomodada pela expansão da área total da agropecuária sobre vegetação nativa.

O efeito competição consiste em um sistema de equações que aloca a participação da área agropecuária para cada lavoura e pasto, em cada região, como função das rentabilidades (própria e das competidoras). Ele estabelece que, para uma dada quantidade de terra para agropecuária, o aumento na rentabilidade relativa de uma atividade irá resultar em um aumento da participação da área dedicada a esta atividade e redução da participação de área de suas competidoras.

As condições de regularidade (homogeneidade, simetria e adicionalidade) são impostas de forma que as matrizes de elasticidades (e seus coeficientes associados) sejam teoricamente consistentes. Para qualquer conjunto desses coeficientes são calculados os impactos e a competição entre as atividades. Assim, a partir dessa estrutura, as simulações realizadas no BLUM nos permitem calcular não apenas alocação de terra, mas também mudanças no uso da terra. Em outras palavras, as condições de regularidade permitem identificar a substituição de área para cada atividade, considerando a quantidade total de área alocada para a agropecuária.

Para garantir coerência das condições acima mencionadas, a área de pastagem é regional e endogenamente determinada, mas considerada como sendo a diferença entre a área total alocada para a agropecuária e a área de lavouras. No contexto da agricultura brasileira, é particularmente relevante projetar a área de pastagem tanto endogenamente quanto regionalmente, pois essa corresponde a, aproximadamente, no presente, 77% do total de área utilizada para agropecuária.

Apesar da competição entre as atividades representar a dinâmica das regiões onde a área agrícola é estável e próxima ao potencial arável, essa análise é insuficiente para o Brasil. No caso brasileiro também é necessário analisar a dinâmica das regiões de fronteira agrícola. A história recente da agropecuária brasileira mostra que lavouras, florestas plantadas e pastagens combinadas respondem a incentivos de mercado e contribuem com a expansão da área total alocada para a agropecuária (Nassar et al., 2011b). Isto é captado no efeito escala do BLUM. Esse progresso metodológico é essencial para ajustar o modelo às realidades específicas da dinâmica do uso da terra no Brasil.

O efeito escala se refere às equações que definem como as rentabilidades das atividades determinam a área total alocada para a produção agropecuária. Mais precisamente, a área total alocada para a agropecuária é uma participação da área arável

total disponível em cada região, e responde às mudanças na rentabilidade média da agropecuária.

Os efeitos escala e competição não são independentes. Em conjunto, eles são os dois componentes das elasticidades-retorno próprias de cada atividade. Considerando a condição *ceteris paribus* (tudo o mais constante), o aumento na rentabilidade de uma atividade possui três efeitos: aumento na área total alocada para a agropecuária (a partir do retorno médio), aumento na área alocada para a atividade (aumento de sua participação no total), e redução na participação da área das outras atividades. Ao mesmo tempo, a elasticidade regional do uso da terra (elasticidade-área-retorno total) com relação à rentabilidade média é a soma das elasticidades escala de cada atividade. Assim, as elasticidades de competição podem ser calculadas diretamente após a elasticidade-área total, enquanto as elasticidades próprias (elasticidade-área com relação à rentabilidade da própria atividade) são obtidas a partir de análises econométricas e de revisão de literatura.

1.2.4 Detalhamento do módulo de uso da terra

Esta sessão tem como base Nassar et al. (2011b), sendo complementada e atualizada quando necessário.

No módulo de uso da terra do BLUM, a área a da atividade i de uma região l ($l=1, \dots, 6$) no ano t é definida pela seguinte equação:

$$a_{ilt} = A_l^T * m_{lt} * s_{ilt} \quad (1)$$

A_l^T é a área arável total disponível para produção agropecuária na região l ; m_{lt} é a fração de A_l^T que está sendo utilizada para a produção agropecuária (todas as lavouras e pastagens), e s_{ilt} é a participação da área usada para agropecuária que é dedicada à atividade i . A_l^T é uma variável exógena definida por técnicas de georreferenciamento (SIG).

A variável m_{lt} é endógena no modelo e responde ao índice de retorno (rentabilidade) médio da agropecuária na região l (r_{lt}), sendo a participação da área alocada para agropecuária definida como sendo:

$$m_{lt} = \frac{A_{lt}}{A_l^T} = k r_{lt}^{\alpha_{lt}} \varepsilon_{r_l}^{A_l} \quad (2)$$

Onde k é uma constante e $\varepsilon_{r_l}^{A_l}$ é a elasticidade-oferta de terra (com respeito ao retorno médio) para a região l. O parâmetro α_{lt} é positivo, maior ou menor do que a unidade, e pode ser definido como:

$$\alpha_{lt} = 1 - \frac{A_{lt} - A_{l0}}{A_l^T} \quad (3)$$

Onde A_{l0} é a área usada pela agropecuária no período definido como base. Os parâmetros foram estimados para a região l com base em dados de rentabilidade e uso da terra (Nassar et al., 2011b). Quando a área agropecuária do período t estiver próxima a do período base, α_{lt} será próximo de 1 e não afeta $\varepsilon_{r_l}^{A_l}$. No entanto, se a área da agropecuária no período t for maior do que àquela do período base, então o parâmetro α_{lt} será menor do que a unidade e reduzirá o efeito de $\varepsilon_{r_l}^{A_l}$. O contrário ocorre quando a área alocada for menor do que (A_{l0}), aumentando o efeito da elasticidade-oferta de terra.

O parâmetro r_{lt} é calculado a partir de evidências que indicam quais atividades se expandem sobre a fronteira agrícola, e é definido como:

$$r_{lt} = \sum_{i=1}^n r_{it} * d_{li} \quad (4)$$

Onde d_{li} é um vetor de pesos da taxa de desmatamento causado por cada uma das atividades agropecuárias, obtidos por imagens de satélite e SIG. Sabendo o desmatamento total (D_l^T) e o dematamento específico da lavoura i (D_{li}), o vetor d_{li} é calculado da seguinte

forma:

$$d_{li} = \frac{D_{li}}{D_l^T}; \text{ em que } D_l^T = \sum_{i=1}^n D_{li} \quad (5)$$

De acordo com Holt (1999), a elasticidade-área (cruzada) da atividade i com relação à rentabilidade das outras atividades j pode ser definida como:

$$\varepsilon_{r_{ij}}^{l,i} = \frac{\partial a_{ilt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{a_{ilt}} = A_l^T \left(\frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt}) + m_l(r_{lt}) \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \right) \frac{r_{jlt}}{A_l^T m_l(r_{lt}) s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (6)$$

Rearranjando, tem-se:

$$\varepsilon_{r_{ij}}^{l,i} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{m_l(r_{lt})} + \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (7)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (6) pode ser definido como sendo o efeito escala da elasticidade-área cruzada $\varepsilon_{r_{ij}}^{s_{l,i}}$:

$$\mathcal{E}_{r_{ij}}^{s_{l,i}} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{m_l(r_{lt})} \quad (8)$$

O efeito competição da elasticidade-área cruzada $\varepsilon_{r_{ij}}^{c_{l,i}}$ refere-se à última parte do lado direito da equação (6):

$$\mathcal{E}_{r_{ij}}^{c_{i,j}} = \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{jlt}} \frac{r_{jlt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} \quad (9)$$

Por analogia, a elasticidade-área da atividade i em relação à sua própria rentabilidade é também formada pelos efeitos escala e competição, podendo ser escrita como:

$$\mathcal{E}_{r_{ii}}^{l,i} = \frac{\partial m_l(r_{lt})}{\partial r_{lt}} \frac{\partial r_{lt}}{\partial r_{ilt}} \frac{r_{ilt}}{m_l(r_{lt})} + \frac{\partial s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})}{\partial r_{ilt}} \frac{r_{ilt}}{s_{ilt}(r_{ilt}, r_{jlt})} = \mathcal{E}_{r_{ii}}^{s_{l,i}} + \mathcal{E}_{r_{ii}}^{c_{l,i}} \quad (10)$$

Onde $\mathcal{E}_{r_{ii}}^{s_{l,i}}$ é o efeito escala e $\mathcal{E}_{r_{ii}}^{c_{l,i}}$ é o componente de efeito competição da elasticidade-área da atividade i com relação a seu próprio retorno.

O componente de competição por terra pode ser calculado como sendo:

$$\mathcal{E}_{r_{ii}}^{c_{l,i}} = \mathcal{E}_{r_{ii}}^{l,i} - \mathcal{E}_{r_{ii}}^{s_{l,i}} \quad (11)$$

Pode-se observar a conexão entre a elasticidade-oferta de terra regional ($\mathcal{E}_{r_l}^{Al}$) e o efeito escala de cada atividade ($\mathcal{E}_{r_{ii}}^{s_{l,i}}$). A elasticidade-oferta de terra pode ser definida como:

$$\mathcal{E}_{r_l}^{A_l} = \frac{\partial m_l}{\partial r_l} \frac{r_l}{m_l} \quad (12)$$

E, rearranjando:

$$\frac{\partial m_l}{\partial r_l} = \frac{\varepsilon_{r_l}^{A_l} m_l}{r_l} \quad (13)$$

A elasticidade em relação à variação do retorno para uma dada atividade i na região l é:

$$\varepsilon_{r_l}^{s_{lj}} = \frac{\partial m_l}{\partial r_l} \frac{\partial r_l}{\partial r_{li}} \frac{r_{li}}{m_l} \quad (14)$$

A qual, a partir da equação (14), com alguns cálculos, pode ser escrita como sendo:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{s_{lj}} = \varepsilon_{r_l}^{A_l} \frac{\partial r_l}{\partial r_{li}} \frac{r_l}{r_{li}} \quad (15)$$

A partir da equação (4), a equação (15) pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{r_{li}}^{s_{lj}} = \varepsilon_{r_l}^{A_l} d_{li} \frac{r_l}{r_{li}} \quad (16)$$

Usando a equação (15), se a elasticidade-oferta é conhecida, o efeito escala da atividade i pode ser facilmente calculado. Como resultado, o vetor contendo todas as elasticidades do componente de competição $\varepsilon_{r_{li}}^{c_{li}}$ representa a diagonal da matriz de competição (uma para cada região l). Juntamente com outras restrições (como as condições de regularidade e elasticidades cruzadas negativas), os termos da diagonal são, então, utilizados para obter as elasticidades cruzadas na matriz de competição, como representado na equação (9).

Para as lavouras de inverno e de segunda safra, tais como trigo, cevada, milho segunda safra e feijão (parte das segundas e terceiras safras a depender da região), a área e a produção alocadas possuem dinâmicas diferenciadas em relação às lavouras de primeira safra apresentadas acima. Considerando o fato de que essas lavouras não competem por terra por serem produzidas após uma safra principal, a área projetada para o milho segunda safra pode ser representada pela seguinte equação:

$$a_{it}^l = \alpha_i^l + \beta_i^l a_{jt}^l + \delta_i^l r_{jt}^l + \varphi_i^l r_{it}^l + \phi_i^l a_{it-1}^l \quad \begin{array}{l} i=\text{milho} \\ j=\text{soja} \end{array} \quad (17)$$

Sendo r_{it}^l a rentabilidade do milho segunda safra, r_{jt}^l é o retorno esperado da soja, a_{jt}^l é a área de soja e a_{it-1}^l é a área alocada para milho segunda safra no ano anterior. Para os parâmetros, tem-se: $\beta > 0$, $\delta > 0$, $\phi > 0$ and $\varphi > 0$.

Para o feijão segunda safra a dinâmica é mais simplificada em relação à do milho, sendo a área projetada dependente apenas de sua própria rentabilidade. No caso do trigo, as projeções de área dependem de seu próprio retorno esperado (positivamente) e negativamente em relação ao retorno da cevada, pois estes grãos competem entre si por área plantada de inverno. Para a cevada, as projeções dependem de seu próprio retorno e da área plantada do ano anterior.

1.2.5 Detalhamento do setor sucroenergético

As principais variáveis do módulo da indústria da cana-de-açúcar são: preços, custos, produtividade agrícola e tecnologias industriais. Estas variáveis definem a área plantada com cana-de-açúcar, a produção de cana-de-açúcar, bem como a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade. A área de cana-de-açúcar e a produção são definidas regionalmente, ao passo que a oferta e a demanda de produtos finais são definidas em nível nacional.

Em cada região j , no tempo t , a produção de cana-de-açúcar ($Y_{cane,j,t}$) é uma função da área de cana-de-açúcar e da produtividade de cana-de-açúcar (y_{cane}), como se segue:

$$Y_{cane,j,t} = y_{cane,j,t} * A_{cane,j,t} \quad (18)$$

A produtividade da cana-de-açúcar é projetada essencialmente como uma tendência, com base em parâmetros estimados a partir do histórico recente. A área de cana-de-açúcar é uma função do retorno esperado por hectare da cana-de-açúcar (π_{cane}), definido em R\$/ha, e do retorno por hectare das outras atividades que concorrem pela área (π_{other}), conforme descrito na seção 1.2.4.

$$A_{cane} = f(\pi_{cane}, \pi_{other}) \quad (19)$$

O π_{cane} de uma região é definido em função do Retorno Equivalente Anual (REA) esperado do conjunto de tecnologias existentes naquela região $\pi_{cane,j,t,n}$, em que cada tecnologia i ($i = 1, \dots, n$) tem uma participação s_n definida em percentual da moagem.

$$\pi_{cane,j,t,i} = \sum_{i=1}^n \pi_{cane,i} * S_i \quad (20)$$

e

$$\sum_{i=1}^n s_n = 1 \quad (21)$$

As principais variáveis que afetam o REA de cada usina são os custos de investimentos, custos operacionais agrícolas e industriais, preços esperados de seus produtos finais (açúcar, etanol e bioeletricidade), tecnologia empregada e respectiva eficiência, custo do capital, taxa de depreciação contábil e impostos.

A construção do perfil tecnológico regional é explorada no Capítulo 2. A participação de cada tecnologia pode mudar ao longo do tempo em função de novos investimentos e alterações das usinas existentes (alterando s_n). As implicações de mudanças do perfil tecnológico em análises prognósticas são exploradas nos capítulos 2 e 3.

A quantidade total de cana-de-açúcar processada em usinas no Brasil no tempo t ($Y_{cane,t}$), nada mais é que a soma da cana-de-açúcar processada em cada uma das regiões j . A quantidade de cana-de-açúcar processada define a quantidade (toneladas) de açúcar total recuperável (TRS_{tot}) disponível para produção de etanol de primeira geração e açúcar através de um fator de conversão (trs), que é projetado ao longo do tempo em função de tendência observada no passado. Vale observar que o trs capta melhorias na parte agrícola, assim como maior eficiência de conversão industrial.

$$TRS_{tot} = Y_{cane} * trs \quad (22)$$

O TRS_{tot} é dividido entre a parcela destinada à produção de etanol TRS_{eth} e TRS destinado à produção de açúcar TRS_{sug} , definidas pelo preço relativo entre açúcar e etanol.

$$TRS_{eth} = f\left(TRS_{tot}, \frac{P_{sug}}{P_{eth}}\right); \quad (23)$$

e

$$TRS_{sug} = TRS_{tot} - TRS_{eth} \quad (24)$$

A produção de açúcar é obtida então pelo TRS destinado ao açúcar e pelo coeficiente de eficiência industrial Υ .

$$\text{Açucar} = \text{TRS}_{\text{sug}} * \Psi \quad (25)$$

De maneira similar, a produção de etanol de primeira geração ($\text{ETH}_{1\text{G}}$) é obtida então pelo TRS destinado ao etanol e pelo coeficiente de eficiência industrial φ .

$$\text{ETH}_{1\text{G}} = \text{TRS}_{\text{eth}} * \varphi \quad (26)$$

O parâmetro φ assume o valor $1,691^{-1}$ para o etanol hidratado, e $1,765^{-1}$ para o etanol anidro. Vale observar que os parâmetros são fixos ao longo do tempo, uma vez que as melhorias da fase industrial já são captadas no parâmetro *trs*.

A oferta total de etanol é igual à soma do etanol de primeira e a produção de segunda geração ($\text{ETH}_{2\text{G}}$), onde a equação de oferta pode ser escrita como:

$$\text{ETH}_{\text{tot}} = \text{ETH}_{1\text{G}} + \text{ETH}_{2\text{G}} \quad (27)$$

No modelo BLUM, o volume $\text{ETH}_{2\text{G}}$ é obtido da multiplicação da moagem em plantas com segunda geração ($y_{\text{sg},2\text{G}}$) pela conversão técnica dessas usinas (τ) (1 etanol / tonelada cana-de-açúcar)

$$\text{ETH}_{2\text{G}} = y_{\text{sg},2\text{G}} * \tau. \quad (28)$$

Um racional muito semelhante ao etanol 2G foi desenvolvido para estimar as vendas de bioeletricidade. A estrutura tecnológica da indústria, eficiências de conversão (bioeletricidade e etanol 2G) são inovações tecnológicas e metodológicas discutidas nos Capítulos 2 e 3 desta tese.

Pelo lado da demanda, as equações de estoques finais de açúcar (Est_{sug}) e etanol (Est_{eth}) são relativamente simples e respondem aos respectivos preços e a uma constante (c) estimados estatisticamente.

$$Est_{sug} = f(c, P_{sug}) \quad (29)$$

e

$$Est_{eth} = f(c, P_{eth}) \quad (30)$$

O consumo interno de açúcar ($Cons_{sug}$) é resultado da multiplicação do consumo per capita pela população, sendo que o consumo per capita responde ao preço no mercado doméstico e ao PIB (GDP) per capita. A fórmula resumida pode ser expressa por

$$Cons_{sug} = f(pop, GDP, P_{sug}) \quad (31)$$

As exportações ora são definidas pela interação do BLUM com modelos globais (i.e., FARPI), ora são definidas internamente pelo BLUM. Idealmente prefere-se trabalhar com modelos globais, em que os principais países do mercado global são segregados individualmente. Tal opção não foi viabilizada para esta tese, em função da não disponibilidade dos recursos necessários.

Na ausência dessa possibilidade, são utilizadas formas reduzidas de equações que simplificam a dinâmica de todos os demais países, tratando-os como “mercado internacional”. Nesse caso as exportações são calibradas usando resultados dos modelos globais para o cenário referência. A perda de qualidade de análise é limitada se o objetivo for avaliar impactos no uso da terra e o comportamento do mercado doméstico.

As exportações de açúcar respondem à população mundial (pop^*), ao PIB internacional (GDP^*), e aos preços do açúcar no mercado doméstico.

$$\text{Cons}_{sug} = f(\text{pop}^*, \text{GDP}^*, P_{sug}). \quad (32)$$

A exportação de etanol tem uma função semelhante à de exportação de açúcar, porém os resultados são muito mais dependentes de políticas internacionais e internas de mercados consumidores não modelados. Dessa forma, pode-se optar também por manter o valor de exportações num valor fixo exógeno predefinido em função do cenário selecionado.

O equacionamento do consumo interno de etanol é mais complexo e merece atenção especial. A versão atual do modelo BLUM foi aprimorada refletindo a estrutura desenvolvida para Babcock et al. (2013). Primeiro projeta-se a frota de veículos leves e sua estrutura em função da frota inicial, das vendas (função do PIB per capita), de curvas de sucateamento (*depr*) e das preferências do consumidor entre carros flex, gasolina, etanol ou elétricos.

Para efeitos de simplificação a modelagem de demanda de etanol não considera veículos elétricos (que não consomem combustíveis líquidos), motos e o consumo de Gás Natural Veicular (GNV). Obtém-se assim as seguintes equações para frota Otto total (Frota_{otto}), frota movida à gasolina C (Frota_{gas}), frota de veículos flex (Frota_{flex}) e frota movida apenas a etanol hidratado (Frota_{hydr}).

$$\text{Fleet}_{otto,t} = f(\text{Fleet}_{t_0}, \text{GDP}, \text{POP}, \text{pref}, \text{depr}) \quad (33)$$

e

$$\text{Fleet}_{otto} = \text{Fleet}_{gas} + \text{Fleet}_{flex} + \text{Fleet}_{alco} \quad (34)$$

Assume-se que todos os veículos têm um nível de consumo igual (Cons_{veic}), que é função do nível de atividade da economia, ganhos de eficiência (*efic*) e preços dos combustíveis (*P_{fuel}*). Mudanças no padrão de consumo (i.e., transferência de modais, entre outros) não são modelados, mas podem ser inseridos exogenamente.

$$\text{Cons}_{vefic} = f(\text{GDP}, \text{efic}, \text{P}_{fuel}) \quad (35)$$

A frota flex consome gasolina (Share_{gas}) e etanol (Share_{eth}), e as parcelas são função dos preços relativos observados pelo consumidor, de modo que:

$$\text{Share}_{gas} = f\left(\frac{\text{Pcons}_{gas}}{\text{Pcons}_{eth}}\right) \quad (36)$$

e

$$\text{Share}_{eth} = (1 - \text{Share}_{gas}) \quad (37)$$

Vale atentar que a equação estimada para os veículos flex registra uma elasticidade muito alta (-5,18) quando o preço relativo de etanol se aproxima a 70% (e menor nas extremidades), de modo que se utilizou uma forma funcional “log-log” para estimativa dessa equação. A melhor forma funcional (equação estimada no período 2006-2015) assumiu o valor mínimo de 0,56 e máximo de 0,72 para os níveis de corte da log-log.

É considerado que a frota de veículos a gasolina consome apenas gasolina C, e a frota álcool consome apenas etanol.

$$\text{Cons}_{gasolina} = \text{Fleet}_{gas} \times \text{Cons}_{veic} + \text{Fleet}_{flex} \times \text{Cons}_{vehic} \times \text{Share}_{gas} \quad (38)$$

e

$$\text{Cons}_{eth} = \text{Fleet}_{alco} \times \text{Cons}_{vehic} + \text{Frota}_{flex} \times \text{Cons}_{vehic} \times \text{Share}_{eth} \quad (39)$$

Os preços ao consumidor do etanol hidratado são projetados em função das variações do preço do etanol anidro⁸ ao produtor $P_{prod_{eth}}$ (variável endógena), acrescido de impostos (tax_{eth}) e margens de comercialização ($margin_{eth}$).

$$P_{cons_{eth}} = P_{prod_{eth}} + tax_{eth} + margin_{eth} \quad (40)$$

O preço da gasolina C ao consumidor ($P_{cons_{gas}}$) é uma função do preço de realização da gasolina A, do percentual de mistura (mix) e do preço do etanol anidro pago ao produtor, além dos tributos e margens de comercialização.

$$P_{cons_{gas}} = P_{prod_{eth}} * mix + P_{prod_{gas}} * (1 - mix) + tax + margin_g \quad (41)$$

Assume-se que o governo brasileiro reduz sua interferência preço de realização da gasolina A, de modo em que o preço da gasolina A é projetado em função do preço internacional da gasolina (que varia em função do preço do barril de petróleo) e câmbio nominal. Todos os preços são projetados em valores nominais e depois deflacionados para considerar as diferenças entre inflação interna e internacional.

⁸ Vale observar que os preços são diretamente correlacionados, de modo que a formação de preços pode ocorrer no mercado hidratado. Nessa seção o objetivo é apenas apresentar a mecânica do modelo.

1.3 Referências do Capítulo 1

ADAMS, D. M., ALIG, R. J., CALLAWAY, J. M., WINNETT, S. M., e MCCARL, B. A.. **The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): model structure and policy applications.** DIANE Publishing. 1996

ASSAD, EDUARDO; PINTO, HILTON S.; NASSAR, ANDRE; HARFUCH, LEILA; FREITAS, SAULO; FARINELLI, BARBARA; LUNDELL, MARK; FERNANDES, ERICK C.M.. **Impacts of Climate Change on Brazilian Agriculture.** World Bank, Washington, DC. World Bank. 2013
openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18740 License: CC BY 3.0 IGO.

BABCOCK, BRUCE A., MARCELO MOREIRA, YIXING PENG **Biofuel taxes, subsidies, and mandates: impacts on US and Brazilian markets.** Fapri Staff Report 13-SR 108. 2013. Disponível em <http://www.card.iastate.edu/products/publications/pdf/13sr108.pdf>. Acesso novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report. Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard.** 2009a. Volume I. Disponível em <https://www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf> Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Board Meeting Comments,** 2009b. Disponível em www.arb.ca.gov/lispub/comm/bccommlog.php?listname=lcfs09. Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report: initial statement of reasons for rulemaking: proposed re-adoption of the Low Carbon Fuel Standard regulation,** 2015. Disponível em www.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15isor.pdf. Acesso em novembro 2016.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. **Commission staff working document - impact assessment.** Brussels, COM (2012) 595 final. 2012. Disponível em https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/swd_2012_0343_ia_en.pdf. Acesso em nov. 2016.

FARINA, ELIZABETH, PHILIPS LETICIA, 2014b. **UNICA's Comments on the Updated Indirect Land Use Change Analysis of the Low Carbon Fuel Standard.** 2014b. Disponível em http://sugarcane.org/resource-library/Unica%20comments%20to%20CARB%20iLUC_values%20-%20October%202014.pdf. Acesso em 2016.

FARINA, ELIZABETH; PHILIPS, LETICIA. **UNICA's Preliminary Comments on Revised Indirect Land Use Change Values.** 2014a disponível em: <http://sugarcane.org/resource-library/UNICA%20LCFS%20iLUC%20revision%20Final.pdf> . Acesso em 2016.

FOOD AND AGRICULTURAL POLICY RESEARCH INSTITUTE – FAPRI. **About FAPRI.** 2016. Disponível em <http://www.fapri.iastate.edu/about.aspx>

FRITSCHÉ, U. AND K. WIEGMANN. **Indirect Land Use Change and Biofuels**. Darmstadt, Germany, Oeko-Institut, Energy e Climate Division., 2011

GOUVELLO, CHRISTOPHE DE. **Brazil low-carbon country case study**. 2010. Disponível em at <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US2014602315>. Acesso in August 2016.

HOLT, MATTHEW T. **A linear approximate acreage allocation model**. Journal of Agricultural and Resource Economics, p. 383-397, 1999.

IRWIN, SCOTT H., ET AL. **The Value of USDA Outlook Information: An Investigation Using Event Study Analysis**. NCR Conference on Applied Commodity Price Analysis, Forecasting, and Market Risk Management, St. Louis MO. 2001.

JANK, MARCOS; VELASCO, JOEL. **UNICA's Comments on Proposed New Pathways for Brazil Sugarcane Ethanol**. 2009. Disponível em www.arb.ca.gov/lispub/comm/bccommlog.php?listname=lcfs09. Acesso em novembro 2016.

KASTENS, TERRY L., TED C. SCHROEDER, AND RON PLAIN. **Evaluation of extension and USDA price and production forecasts**. Journal of Agricultural and Resource Economics, 244-261. 1998

LA ROVÈRE, E. L.; WILLS, W.; PEREIRA JR, A. O.; DUBEUX, C. B. S; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, B. C. P.; MOREIRA, M.M.R.; WATANABE, S; LOUREIRO, S. M.; GROTTERRA, C.; HARFUCH, L.; WEISS, M.; SANTOS, L. A. S.; CARVALHO, P.T.; KISHINAMI, R.; ZVEIBIL, V.; SANTOS, L.; ELY, R. N.; MOREIRA, L. S. S.C.; KIMURA, W.; SANTOS, T.; TONI, A.; LEFREVE, J.; BACHION, L. C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; WALTER, M. K. C; ZICARELLI, I.; E OLIVEIRA, L. D. B.. **Implicações Econômicas E Sociais De Cenários De Mitigação De Gases De Efeito Estufa No Brasil Até 2030: Projeto Ies-Brasil**, Forum Brasileiro De Mudanças Climáticas – FBMC. Coppe/Ufrj, Rio De Janeiro, 2016.

LABORDE. **Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies**. ATCLASS Consortium. Implementing Framework Contract No TRADE/07/A2. 2011; disponível em <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll15/id/197>. Acesso em novembro 2016.

LAPOLA, D. M., R. SCHALDACH, J. ALCAMO, A. BONDEAU, J. KOCH, C. KOELKING AND J. A. PRIESS. **Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil**. 2010 Proceedings of the National Academy of Sciences 107(8): 3388-3393.

LEE, H. L., HERTEL, T., SOHNGEN, B., & RAMANKUTTY, N.. **Towards an integrated land use data base for assessing the potential for greenhouse gas mitigation**. GTAP Technical Papers, 26., 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Fundamentos para iNDC brasileira**. 2016. Disponível em <http://www.mma.gov.br/quem-%C3%A9-quem/item/10710-fundamentos-para-a-elabora%C3%A7%C3%A3o-da-pretendida->

contribuiu para a definição de uma meta nacionalmente determinada-indicador do Brasil no contexto do Acordo de Paris.

MOREIRA, M.M.R.; HARFUCH, L.; KIMURA, W.; BACHION, L.C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; DUBEUX, C.B.S.; E WALTER, M.K.C.. Cenários de AFOLU. In: LA ROVERE, E. L. et al., 2016 – **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil**, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

MOREIRA, MARCELO, ANDRÉ NASSAR LAURA ANTONIAZZI LUCIANE C. BACHION LEILA HARFUCH. **Direct and indirect land use change assessment**. Em (Cortez and Poppe (org.) Sustainability of sugarcane bioenergy - Updated edition. – Brasília, DF : Center for Strategic Studies and Management (CGEE), 2012. Capítulo 9 p. 207-237.

NASSAR, A. M., L. HARFUCH, L. C. BACHION AND M. R. MOREIRA. **Biofuels and land-use changes: searching for the top model**. Interface Focus 1(224–232). 2011a.

NASSAR, A. M., L. HARFUCH, M. R. MOREIRA AND L. C. BACHION **Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agro-industrial and Environmental Impacts**. FAPESP-PROGRAMA BIOEN. Relatório Científico Final 2011b.

NASSAR, ANDRÉ MELONI; HARFUCH, LEILA; MOREIRA, MARCELO MELO RAMALHO; BACHION, LUCIANE CHIODI; ANTONIAZZI, LAURA BARCELLOS A; SPAROVEK. **Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using the Brazilian Land Use Model (BLUM)**. 2009. Disponível em www.iconebrasil.com.br/datafiles/biblioteca/documentos/2009/impacts_on_land_use_and_ghg_emissions_from_a_shock_on_brazilian_0109.pdf. Acesso em novembro 2016.

PLEVIN, R. J.; GIBBS, H. K.; DUFFY, J.; YEH, S. **Agro-ecological Zone Emission Factor Model**; University of California: Berkeley, CA; University of Wisconsin: Madison, WI; California Air Resources Board: Sacramento, CA, September 12, 2011.

SOARES-FILHO, B. S., NEPSTAD, D. C., CURRAN, L. M., CERQUEIRA, G. C., GARCIA, R. A., RAMOS, C. A., ELIANE VOLL1, ALICE MCDONALD, PAUL LEFEBVRE3 e PETER SCHLESINGER & SCHLESINGER, P.. 2006. **Modelling conservation in the Amazon basin**. Nature, 440(7083), 520-523.

TAHERIPOUR F, TYNER WE. **Biofuels and Land Use Change: Applying Recent Evidence to Model Estimates**. Applied Sciences. 2013; 3(1):14-38. Available at <http://www.mdpi.com/2076-3417/3/1/14/pdf>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA **Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program**. EPA-420-D-09-001. 2009.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Regulation of Fuels and Fuel Additives: Changes to Renewable Fuel Standard Program Final rule.** Federal Register / Vol. 75, No. 58 / Friday, 26 Março, 2010. Disponível em <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-03-26/pdf/2010-3851.pdf>; Acesso em Novembro 2016.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.** EPA-420-R-10-006. Fevereiro de 2010. Disponível em <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/420r10006.pdf>. Acesso em agosto 2015.

VALIN, HUGO, DAAN PETERS, MAARTEN VAN DEN BERG, STEFAN FRANK, PETR HAVLIK, NICKLAS FORSELL AND CARLO HAMELINCK, JOHANNES PIRKER, ALINE MOSNIER, JURAJ BALKOVIC, ERWIN SCHMID, MARTINA DÜRAUER AND FULVIO DI FULVIO. **The land use change impact of biofuels consumed in the EU Quantification of area and greenhouse gas impacts.** 2015.

VELDKAMP DIJST, M. J., VERBURG, P. H., SCHOT, P. P.. **Land use change modelling: current practice and research priorities.** GeoJournal, 61(4), 309-324. 2004.

2 LAND USE AND OTHER INDIRECT IMPACTS OF LARGE SCALE ADOPTION OF HIGH EFFICIENCY COGENERATION SYSTEMS IN SUGARCANE ETHANOL MILLS^{9,10}

2.1 Abstract

The Brazilian Intended National Determined Contribution (iNDC) has set ambitious targets and, according to the plan, the share of bioenergy should be no less than 18% of the energy matrix by 2030, in addition to substantial contribution (at least 23% by 2030) of renewables (other than hydropower) in electricity generation. Whereas sugarcane already represents about 17% of energy matrix, the current share of renewables in the power sector is slightly more than 12%. In this sense, sugarcane bioelectricity is expected to play a major role in meeting the target. The objective of this study is to understand the contributions of bioelectricity policies and the adoption of highly efficient cogeneration technologies in order to meet Brazilian iNDCs 2030 targets. It evaluates the direct and indirect impacts of surplus electricity generation, in particular on the agricultural market (mainly in the sugarcane sector), on land use change and on GHG emissions. The method is based on an improved version of a partial equilibrium economic model (BLUM), which required identification of regional industry profile, respective trends and long-term simulations. In the Reference Scenario, in 2030 ethanol production reaches 54 billion liters of ethanol and 31 TWh year⁻¹ of bioelectricity surplus; ethanol production would correspond to the targets, but bioelectricity would be less than half of the necessary contribution. On the other hand, with better price signals the bioelectricity surplus doubles to 61 TWh year⁻¹, but still below the target. With the use of straw as fuel the surplus would be enlarged to 110 TWh year⁻¹. The large-scale surplus electricity production helped to increase sectoral income, to reduce sugar and ethanol prices and to expand sugar and ethanol production.

⁹ O texto está em versão para submissão em artigo internacional e, por isso, o uso da língua inglesa.

¹⁰ Autores: Marcelo M. R. Moreira; Arnaldo C. S. Walter; Marcelo P. Cunha; Willian J. Kimura; Leila Harfuch; Luciane C. Bachion.

The consequential greenhouse gas (GHG) life cycle analysis reveals that, apart from substitution of marginal electricity, about one third of the GHGs emissions mitigation happens in the transport sector. In addition, direct and indirect emissions due to land use change (LUC and iLUC) are small compared to GHG benefits. In the alternative scenarios the GHG mitigation was estimated at 0.134 and 0.296 GtCO₂eq year⁻¹ until 2030, respectively. The findings of this paper strongly encourage policies that benefit bioelectricity, and, particularly, the development of technologies that improves the use of agricultural residues for power generation.

2.2 Introduction

According to Intended Nationally Determined Contributions (iNDCs), submitted for the COP21, event held in 2015, Brazil intends to adopt further measures that are consistent with avoiding the maximum elevation of 2°C in Earth, with particular focus on (i) increasing the share of sustainable biofuels in the Brazilian energy mix, (ii) adopting measures related to land use and forests, and (iii) achieving 45% of renewables in the energy matrix by 2030. Overall reductions of GHGs emissions are aimed at 43% in 2030 compared to 2005. Paris Agreement entered into force on 4 November 2016, with implementing period starting in 2020. The intended submissions became Nationally Determined Contributions (NDC) and governments urgently need to put significant efforts to develop policies that will enable the achievement of their GHGs reduction targets.

In this sense, sustainable biofuels should be approximately 18% of the energy mix by 2030 by increasing its ethanol supply and the share of biodiesel in diesel mix. Further, the Brazilian Intended National Determined Contribution (iNDC) sets the target of “[...] expanding the use of non-fossil fuel energy sources domestically, increasing the share of renewables (other than hydropower) in the power supply to at least 23% by 2030 [...]”¹. The sugarcane sector already represents around 17% of Total Primary Energy Supply (TPES), whereas biodiesel represents about 1%. Non-fossil electricity sources (other than hydropower) represent about 12% of the power supply². So, apart from keeping pace with other sources of the energy matrix, there is still a significant gap in power sector to be fulfilled.

In a recent document³, it was indicated that the iNDC was based on the assumption of producing 54 billion liters of ethanol in 2030, a growth of about 80% in 15 years. Bioelectricity (which currently represents about 8% of electricity sources), would have to reach 134 TWh (including auto-supply and electricity surplus). The growth is shared unequally between auto-supply (growth of 52%) and electricity surplus that is sold to the national grid (growth of 322%). In absolute numbers, bioelectricity surplus would have to reach 76 TWh in 2030.

This is particularly challenging in a developing country with growing energy needs and that is exploring new frontiers on the oil industry. As an example, thermoelectricity from natural gas jumped from 5 to 14% of total supply between 2005 and 2015². On top of that, Brazilian agriculture is under a significant stress once the country is expected to be a major player in securing food supply⁴ whereas the iNDC increases the pressure for controlling Greenhouse Gases (GHG) emissions in the land use sector.

The sugarcane bagasse is the main fuel used in mill's cogeneration systems that provide steam and electricity to supply the sugar and ethanol production process. When modern cogeneration systems and energy efficient process are adopted, sugarcane mills may also sell electricity surplus to the grid. Even though a more efficient system increases the investment costs of mills, the sale of electricity surplus can increase the profitability by using bagasse as a fuel that is already available at the plant⁵. The adoption of long-term contracts of electricity purchase in public loans has played a major role in the adoption of such technology. Since beginning of new loan system, electricity surplus became a third product (along with sugar and ethanol) of the sugarcane sector. Such sales grew from 1 TWh in 2005 to 20 TWh in 2015⁶. Although impressive, the historical absolute annual growth is not enough to reach the required 76 TWh.

Bagasse is only available during sugarcane harvesting season. Potentially, it has a great complementarity with hydroelectricity once sugarcane harvesting happens in the dry season in central Brazil, but this leads to idle capacity during off-season months. Important technological developments in sugarcane harvesting and cogeneration systems may reduce this constraint. When sugarcane straw is used as complementary fuel, idle capacity can be reduced by half and electricity surplus can more than double in a per hectare basis. Apart from leading to significant GHGs emissions mitigation (by

displacing marginal electricity in Brazil), it can be an important source of revenue to the sugarcane sector, if challenges in trash recovery and adjustments in combustion technologies are adequately addressed^{7,8}.

The following questions arise regarding the future of biomass as source of electricity: To what extent the sugarcane sector can contribute to the iNDC target in non-fossil electricity? What role new bioelectricity policies and technologies can play? What would be the indirect effects in agricultural production levels and land use change? What is the balance in terms of GHGs emissions once all factors have been taken into account?

Thus, the main objective of this study is to understand the contributions of the adoption of highly efficient cogeneration technologies to meet Brazilian iNDCs 2030 targets, evaluating its direct and indirect impacts in agricultural market (particularly sugar and ethanol), land use change and GHG emissions.

To reach the main objective, this study (i) Identifies the current technological profile of the sugarcane sector both at national and regional levels, understanding the main characteristic and trends and (ii) simulates scenarios that anticipate possible futures depending on levels of public incentive and technology developments. The contribution to Brazilian iNDC is analyzed in production levels of ethanol and bioelectricity surplus, as well as in direct and indirect GHGs emissions and mitigations.

2.3 Methodology

The methodological approach is mainly based on the long term simulations of Brazilian agriculture (also for bioenergy) and land use in different scenarios, for the period 2010-2030, using the Brazilian Land Use Model (BLUM). The BLUM model was initially developed in a partnership between the Center for Agricultural and Rural Development (CARD, Iowa State University) and the Brazilian Institute for International Trade Negotiations (ICONE) to improve the methodologies used by the Food and Agricultural Policy Research Institute (FAPRI). BLUM was used to quantify direct and indirect effects of biofuels expansion, including direct and indirect land use

changes (LUC and iLUC), supporting US-EPA rulemaking process for Renewable Fuel Standard⁸. The model rapidly became a major tool used for planning long-term mitigation and adaptation strategies in Brazilian Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector^{9,10,11}. BLUM is quoted as one of the references for Brazilian iNDC¹².

It is a one-country, multi-regional, multi-market, dynamic, partial equilibrium economic model for the Brazilian agricultural sector. The model includes the following products: soybeans, corn (first and second crop), cotton, rice, dry beans (first and second crop), sugarcane, wheat, barley, dairy, livestock (beef, broiler, eggs and pork) and commercial forests, which represents about 95% of Brazilian agricultural area. It splits Brazilian territory into six main geographic regions according to agricultural patterns and land characteristics such as biome limits, environmental legislation and land use dynamics. Figure 1 shows the six regions considered. A comprehensive description of the BLUM model structure is available at Nassar et al.¹³.



Figure 1: Brazilian regions considered in the BLUM model

Source: Agroicone

The main variables of the sugarcane industry section are: prices, costs, agricultural yields and industrial efficiency coefficients. These variables define sugarcane area, sugarcane production, as well as sugar and ethanol production. Sugarcane area and production are defined regionally (as a function of regional profitability), whereas supply and demand of final products interact nationally. The technological description of the sugarcane module was improved for this paper by enlarging technological description and capabilities of the sugarcane module. The analysis is developed in four methodological stages.

The First Stage consists of mapping industrial technologies (existing and innovative) and representing them as “standard mills”. Each standard mill has a simplified set of conversion technologies (i.e., how much sugar, ethanol and electricity are produced from one tonne of sugarcane), as well as economic indicators such as profitability per hectare. The expected return per hectare of each standard mill is derived from the equivalent annual return for the mill. Mills are considered to be vertically integrated, i.e., with agricultural production of sugarcane. Profitability is a function of the mill’s costs, yields (agricultural and industrial) and prices of final products (sugar, ethanol and electricity).

In each region j and time t , the return per hectare of each “standard mill” that uses technology i ($\pi_{cane,j,t,i}$) is defined as the return per tonne of sugarcane ($\pi_{t_cane,i}$) times regional yield.

$$\pi_{cane,j,t,i} = \pi_{t_cane,i} * Y_{cane}. \quad (1)$$

The return per tonne of sugarcane is defined as the equivalent annual value (EAV_{mill}) of a sugarcane “Greenfield” mill, divided by the respective annual sugarcane crush. Greenfield refers to a new mill. Capital costs of investments are included.

$$\pi_{t_cane,j,t,i} = \frac{EAV_{mill_i}}{crush_i} \quad (2)$$

The EAV_{mill} is a function of investments costs, annual costs, regional sugarcane agricultural costs, expected prices of its final products, depreciation rate, taxes and interest rate.

The Second Stage consists on the representation of the technology in the BLUM model. For this step, the regional profile of the sugarcane industry across time was identified, according to the existing technology, by collecting industry data from several sources. Data sources are extensive and described in Supplementary Material (Appendix 2.7.1 and 2.7.2). Once the technological profile was created, it was represented in the model through a combination of the standard mills of “First Stage”. The combination of standard mills that best fit as the actual profile of the sugarcane industry is called the industry profile in that particular year. The industry profile is used to calculate regional rate of return of sugarcane as follows:

$$\pi_{\text{cane},t} = \sum_{i=1}^n \pi_{\text{cane},i} * s_i \quad (3)$$

Where s_i is the share of each technology i in the total crush of each region. It is important to notice that s_i is not constant over time and should change based on the depletion (and substitution) of the exiting mills, as well as the creation of additional crush capacity.

The Third Stage simulates sugarcane expansion in the model according to the predefined policy and technological scenarios. In each year, as more sugarcane is brought into production and a share of old mills have to be retrofitted, so investment decisions have to be made. Investors are likely to compare expected NPV of each mill type and decide for the one(s) that has (have) highest expected return. This decision selects the new “standard mills” which are created and added to the industry profile for the next season.

Additional crush is the major reference for new investments. Boilers are most expensive equipment in sugarcane mills and have a life of about 25-30 years. After that they need to be retrofitted, so it is assumed that all crushing capacity will be changed in 25-30 years.

Once all adjustments are implemented in the model, the Fourth Stage analyses the impact of policies and technology adoption and infers whether and how those could be important to reach the targets of the Brazilian iNDC. In order to measure impacts of this technology, one scenario serves as a Reference while the others consider progressive policies and technologies. Impacts of each policy or technology

development can be evaluated through a static comparative analysis of model equilibriums. The analysis focuses on bioelectricity generation and its indirect effects on ethanol production, agricultural production, prices, land use change and GHG emissions between 2010 and 2030.

2.4 Results

The first sub-section reports the latest developments in regional technology profile of the sugarcane sector, while the second set of results focuses on the potential impacts of large scale adoption of cogeneration technology in a future perspective.

2.4.1 Regional profile of the sugarcane sector

Return per standard mill

Usually, more than 60% of the costs of the products of a sugarcane mill are related to the agricultural phase^{14,15}. Industrial characteristics can be considered homogenous and do not depend on the region where the mill is located; on the other hand, it is recognized that agricultural characteristics of sugarcane production can be very different among regions. The latter one has influence on the first.

The main regional characteristics of sugarcane are: operational agricultural costs; yield (tonnes of sugarcane per hectare); and sugar content, reported as Total Recoverable Sugars (TRS). Total production of sugar and 1st generation ethanol is a function of the amount of cane in one hectare, the TRS of the sugarcane and industrial yields. Historically, the Southeast has the highest yield per hectare, followed by the Center West and South regions. The North region has very low productivity per hectare, especially due to the low TRS. Yields and costs depend on various circumstances, such as climatic conditions that are not constant over time and vary across regions. The necessary information was collected every year for the construction of the time series of costs and yields and described in Supplementary Material (Appendix 2.7.2).

Agricultural operational costs are essentially composed of planting, crop management and harvesting costs. Harvesting costs (including logistics), which represent up to half of operational costs, depend mainly on the distance between the

sugarcane field and the mill. Therefore, transportation costs increase as a function of the size of the mill, the availability of area around the mill, and the average yield. Harvesting process can be mechanized in flat areas, or manual in all areas. Mechanical harvesting is also called green harvesting, once sugarcane fields must be burned prior to manual harvesting process. Green or manual harvesting is regionally chosen according to terrain characteristics, labor cost and workers availability, legislation and environmental commitments. BLUM sugarcane cost is estimated using simplified version of a software (the Virtual Sugarcane Biorefinery¹⁶) and calibrated with annual cost database (see Supplementary Material for details).

The costs per tonne of sugarcane are lower in the most traditional region (Southeast), closely followed by South (where the production is geographically close to the border of the Southeast region). The Center West Cerrado region reported a relatively good yield although costs are slightly higher than in the traditional regions. Rent costs are not included, and they can be significantly higher in the South and Southeast. This helps to explain why the Center West region is recognized as the expansion region for sugarcane.

The industrial design of a sugarcane mill can be replicated in all Brazilian regions without important modifications. Therefore, agricultural and market features are the main reasons for the regional differences in industrial characteristics. The main characteristics of current existing mills are presented in Table 1. Mills are classified producing only ethanol, only sugar or having mixed production of both. The electricity surplus depends essentially on the cogenerating system at the mill, operational efficiencies and whether additional fuel (i.e., straw) is supplied in the boilers. The information presented refers to typical figures of 2014/15 crop season and estimates for an average mill of 2 million tonnes (Mt) of sugarcane processed per year (that is the average capacity of existing mills).

Table 1 Yields and total base investment (2015 figures) for different mill configurations, considering 2 Mt/year

Industry type / yield per t of sugarcane	Ethanol (l/t of cane)	Sugar (kg/t of cane)	Electricity (kWh/t of cane)	Industrial investment (million US\$)
Ethanol only, no electricity surplus	83	0	0	153.2
Sugar only, no electricity surplus	0	102	0	164.3
Mixed, no electricity surplus	52	51	0	171.9
Mixed, low electricity surplus	47	61	20	196.2
Mixed, high electricity surplus	46	61	76	200.0
Ethanol only, new tech	83	0	162	221.3

Note: Costs of grid connection are considered for mills that sell electricity to the grid. Mixed means that mill produces both sugar and ethanol. The exchange rate considered is 2.63 R\$/US\$, that is the average figure in January 2015.

Source: from the authors, using data from ^{16, 17}

Investment costs increase with technological improvements and total required capital is significant, especially if one considers that the mill takes up to three years to start producing. Economies of scale are considerable: considering a mill of 2 Mt sugarcane / year as references, the specific investment is 10% lower for a mill of 3 Mt/year and 13% higher for a mill of 1.5 Mt sugarcane / year.¹⁸

The literature review identified that the following additional parameters should be considered to calculate the NPV of industrial sugarcane installations: 25 years of average project lifetime; depreciation rate of 10% a year, in 10 years (for taxes proposes); 160 direct employees in the industrial plant of 2 Mt per year (number of employees are directly proportional to crush); Weighted Average of Capital Cost of 6.5% a year (after discounting inflation). Typical mill investment involves approximately 40% of private capital and 60% funded by the Brazilian Development Bank (which reduces the cost of capital). Brazilian income tax is around 34%. Costs of grid connections for electricity sales depends on distance to nearest substation and were estimated at 7.3 million US\$ for 20 km distance (exchange rate of 2.63 R\$/US\$ was considered).

2.4.2 Regional profile of sugarcane mills

The decision regarding the industrial characteristics depends on a combination of factors, such as agricultural restrictions, price of final products (sugar, ethanol and electricity), land availability, industrial and agricultural costs, among others. Through history, different circumstances led to different decisions in each region, resulting in different industrial profiles.

Considering three groups of mill based on the crushing capacity (up to 1.5 Mt, between 1.5 and 3.0 Mt and above 3 Mt), for each region it was first identified how much sugarcane was crushed each year according to its main products (ethanol only, sugar only, or both), and the total annual crush per industrial unit,. Results are presented in Table 2.

Table 2 Regional industry profile in 2014/15, according to final products and annual crush

Annual crush	Final products	South	South-east	Center West Cerrado	North Amazon	Northeast Coast	Northeast Cerrado	Brazil
<1.5	Ethanol	6%	3%	23%	30%	9%	18%	8%
1.5<..<3	Ethanol	5%	1%	25%	0%	0%	0%	6%
>3	Ethanol	0%	0%	13%	0%	0%	0%	2%
<1,5	Mixed	20%	8%	17%	70%	61%	0%	15%
1.5<..<3	Mixed	36%	40%	14%	0%	18%	59%	33%
>3	Mixed	33%	48%	8%	0%	0%	23%	35%
<1.5	Sugar	0%	0%	0%	0%	12%	0%	1%
1.5<..<3	Sugar	0%	1%	0%	0%	0%	0%	1%

Source: from the authors, using data from ^{18, 20, 21, 22}

As, typically, all large scale mills have mixed production, in 2014/2015 most of the mills produced both sugar and ethanol. No mill with annual crush higher than 3 Mt was found to produce only one product (when electricity is considered). Intuitively, this pattern can be explained as a risk aversion strategy on the part of the producer. Mixed mills allows for switching from sugar to ethanol (and vice-versa; this can be done with constrains) according to relative prices. Another reason is that it is viable to produce

ethanol as a byproduct of sugar (from the molasses), and only small mills produce only sugar.

The Northeast Coast region differs from the Brazilian average, having a significant share of small mills (almost 90% of the total) and a non-negligible share of mills that produce only sugar. This is partially due to a history of preferential trade agreements with developed countries, and because of the geographical impediments and low yields that restrict large-scale production in this region. Although the Center West region is seen as the expansion area for sugarcane, through new investments, the share of large sugarcane mills is lower than in the South and Southeast. The probable explanation is that mills in that region have not yet reached their maxim crush.

Due to the objective of this paper, the main characteristics regarding electricity production are described in more details. Table 3 reports the estimate in annual sugarcane crush (total and in mills with electricity surplus), as well as total electricity sales from sugarcane mills to the national grid.

Table 3: Estimate of regional characteristics of electricity sales by sugarcane mills in 2014/15

Region	Total crush (Mt/year)	Crush in mills with electricity surplus (Mt/year)	Share of crush in exporting mills	Total electricity (GWh/year) sales
South	43	21	50%	1,085
Southeast	406	244	60%	12,741
Center West Cerrado	119	65	55%	4,771
North Amazon	9	-	0%	-
Northeast Coast	48	20	41%	598
Northeast Cerrado	9	4	51%	206
Brazil	635	356	56%	19,400

Source: From this study. Based on ^{19, 20, 21, 22, 23, 24}

The results show that in Brazil more than half of sugarcane is crushed in mills that sell electricity to the grid. The Southeast region, which is responsible for 63% of sugarcane crush, is also the leader region in electricity sales (66% of total). The Center West Cerrado region has the second largest result in crush and electricity sales. The Northeast coast is in the third place in crush, but fourth in electricity sales, indicating lower adoption of advanced cogeneration technologies. It was not possible to identify a

single sugarcane mill in the Amazon that sells electricity to the grid. The Center-West region also has the highest ratio in terms of electricity sales over total crush, indicating the use of higher efficiency conversion technologies in that region.

Due to long lifetime of some equipment (particularly boilers) the current technological profile of energy systems is defined by technology adoption along time. Leal²⁴ describes the recent technological evolution phases. After the Proalcool (the national program that fostered large production of fuel ethanol), due to higher energy costs, mills reduced internal consumption and improved boilers efficiency (technologies such as pre-heating, and heat recovery). As a result almost all mills reached energy self-sufficiency in the 1990's (steam generation at 22 bar/300°C). A new regulatory framework in the electric sector launched the phase where mills started selling electricity to the grid. Although electricity surplus were lower than expected in first years, technology adoption accelerated due new electricity auctions for new capacity and special credit conditions (since 2007) for mills that adopted high-pressure boilers. The current standard technology (steam generation at 65 bar/480°C) allows for electricity output higher than 80 kWh/ tonne of sugarcane (using only bagasse). Commercial technology is available for electricity surplus higher than 100 kWh/t cane with modern cogeneration system and use of sugarcane trash as complementary fuel²⁵,²⁶.

The Third Stage is the estimation of technology levels in electricity exporting mills. The technology level of mills that sells energy was divided in three groups, associated to efficiencies:

- Entrance tech (reference electricity surplus of 20 kWh/t cane)
- High tech (reference electricity surplus of 70 kWh/t cane)
- New tech (electricity surplus higher than 100 kWh/t cane)

These ranges are typical values of efficiency observed in Brazil and in the literature. The first published wide-country survey indicated average of 26 kWh/t cane for mills that had electricity surplus in 2009 (with small dispersion).²⁷ The documents presented by candidate mills in public auctions indicate an average of 74 kWh/t cane between 2009 and 2015.²⁸ Table 4 presents the results of the classification process according to the average efficiency of surplus electricity generation.

Table 4: Estimated sugarcane yield to electricity in mills that sold electricity in 2014/15 harvest season (efficiency and regional share of each technological range).

Region	Average yield (kWh/t)	Entrance tech	High tech	New tech
South	50	40%	60%	0%
Southeast	52	36%	64%	0%
Center West Cerrado	73	12%	83%	5%
North Amazon	0	0%	0%	0%
Northeast Coast	30	80%	20%	0%
Northeast Cerrado	43	54%	46%	0%
Brazil	55	34%	64%	1%

Source: From this study, based on 2, 21, 22, 23.

When only mills that sell electricity are considered, the national average surplus electricity ratio is about 55 kWh/t cane. The Center West Cerrado is the region with highest average efficiency for mills that export electricity. It is also the region with higher adoption of high technology and the only region with a non-negligible share of mills using technologies that allow for efficiencies above 100 kWh/t cane (surplus). Considering the recent expansion into that region it is reasonable to suppose that existing mills that are not exporting electricity will do so with high technology (once grid connections and availability of capital issues would be solved), impacting the total electricity from sugarcane sector.

The South and Southeast regions present similar figures, with more balanced shares between *entrance* and *high* tech. Sugarcane production in those regions is traditional and older mills have infrastructure to sell electricity but, on average, using entrance technologies. In those regions technology change is slower, once it requires substitution of existing infrastructure. The Northeast coast has the lowest average efficiency and the profile is highly concentrated in entrance technologies. This is probably related to mill's size (smaller than average) and the focus on sugar as final product. Northeast Cerrado region has a quite balanced division between entrance and high efficiency. Nevertheless, sugarcane production is quite recent in this region and significant changes in technology share can occur rapidly, alongside the expansion of

sugarcane crush. Time series of industry profile for each region is presented in the Supplementary Material (Appendix 2.7.2).

2.4.3 Simulations

This part of the study focuses on the prospective analysis and is based on simulations from 2010 to 2030. It was assumed that investors look at electricity prices to make their decisions on which technology to invest in. Investment opportunities appear in case of new facilities and at the moment of retrofitting the existing mills.

In the Reference scenario the average price for electricity was assumed at R\$130/MWh. This is the observed price in public auctions (2013), in which biomass had a small participation among the winners. With no incentive to change cogeneration technology, the current technology profile (in 2014) was considered for the whole period. The electricity price was changed to R\$200/MWh in the Progressive scenarios, which can be understood as an incentive to implement the most efficient available technology for electricity surpluses whenever possible.

The first Progressive (PS1) scenario assumes that large-scale mills (larger than 3 Mt/year), with high-pressure boilers cogeneration systems and just using bagasse as fuel, on average selling 76 kWh per tonne of cane, are the most efficient technology available. It would be adopted in 90% of investments in South, Southeast, Center West Cerrado and Northeast-Cerrado. Northeast coast mills have size limitations, and investors would adopt new technology but without changing mill's size. No mill in the Amazon region is expected to export electricity in the projected period.

The second Progressive (PS2) scenario assumes that sugarcane straw recovery becomes a commercial technology and, in addition, it would be possible to burn straw as fuel to raise steam at high pressure and temperature. Currently there are two drawbacks for using straw as fuel in large scale: first, the recovery of straw at the field and its transportation at low cost to the mill site; second, its use as fuel has caused problems in boilers due to fouling and slagging. With straw, combined with most efficient industrial cogeneration technology systems, electricity surplus could reach up to 162 kWh/t cane (considering 50% of straw is left in the field). It was assumed once

these constraints are overcome, the same PS1 electricity price (R\$200/MWh) would be enough for inducing investments. The regional adoption of such technology is similar to the PS1. Being conservative, it was assumed that 80% of the Southeast, Center West Cerrado and Northeast-Cerrado sugarcane area could have mechanical harvesting of sugarcane stalks and straw recovery. About 97% of the Center-South mills already registered mechanical harvesting in crop season 2015/16. This figure falls to 10% in the Northeast area, due to limitations of mechanical harvesting (topography).

Macroeconomic scenario is the same in the three technological scenarios considered, and they are defined by the following parameters: Brazilian population, economic activity, inflation and exchange rates published by IMF²⁹ until 2020 and by OECD-FAO³⁰ after 2020 (average growth of 2,5% a year after 2017). OECD-FAO is also a reference for international trade of sugar and ethanol. Light vehicles fleet is expected to reach about 60 million cars (56% higher than 2015), of which 92% are flex-fuel cars.

Oil prices are from IEA³¹ “low price scenario”, starting from about 50 US\$ in 2015 and reaching US\$ 90 per barrel in 2030. No price arbitrage between national and imported gasoline wholesale is assumed, so a continuous increase in gasoline domestic price is perceived by consumers due to recovery of oil prices and exchange rate. Once the focus of the study is on bioelectricity, the reference scenario already considers a tax differential in favor of ethanol compared to gasoline, reflecting the 2015 liquid fuels tax structure in Brazil. According to the results, keeping the tax differential is necessary to meet the ethanol targets in iNDC.

Reference Scenario

A combination of factors induces total sugarcane crush to grow 69% in the Reference scenario, between 2010 and 2030. Average sugarcane production cost is reduced by 14%, particularly due to the combination of lower fixed costs per hectare and yield increase. Domestic sugar consumptions are defined by population growth and estimated as per capita consumption. Brazilian sugar exports grow 2% per year³⁰. Ethanol exports reach 6.8 billion liters in 2030, assuming expansion of international demand for advanced ethanol (that avoids high GHGs emissions regarding gasoline) and depreciated exchange rate. Domestic fuel ethanol consumption reaches 45.5 billion liters, as a result of the alignment of national and international gasoline prices and tax

structure, so total production reaches about 54 billion liters. Technology profile mirrors 2014 shares, resulting 30.1 TWh of bioelectricity sold by the sugarcane sector to the grid in 2030. Sugarcane area grows 46%, reaching 13.3 million hectares in 2030. Most of the growth is concentrated in Center West, followed by Southeast region. In each of these regions the growth is 1.8 and 1.5 million hectares, respectively.

Grains, meat and planted forest production grow significantly in the Reference scenario. Total grains production reaches 291 million tonnes in 2030, from 149 Mt in 2010. The great majority of this expansion is due to soybeans and the 2nd crop of corn production system, whereas 1st crop of corn has declining production. The development of soybean + 2nd crop of corn system allows for two harvest of grain in the same area in one single season. Although more risky than traditional harvest, the system has been improving significantly, making it quite responsive to demand stimulus. Meat production grows about 37%, reaching 34 million tonnes in 2030.

As shown in Figure 2, area expansion is lower than production because of traditional yield growth and adoption of new production systems (2nd crop). Grains' area expands by 38% compared to 95% of production, particularly because of decline in first crop of corn area that is compensated by soybean + 2nd crop of corn system in the Cerrado region. Planted forest is expected to grow 4.7 million hectares, mostly over low tech pastureland areas; this estimate is exogenous to the supply and demand model, and is based on literature review. The losses of pastureland for all other land uses registered increasing production with declining area. This trend reflects the huge change in beef production system, from low to medium technology, which is consistent with trends observed in last decade. It can also be noted the expansion of pig and broiler meat that uses grains (not land) as major input.

Total area used by agriculture expands by 5.9 million hectares between 2010 and 2030. Among the six studied regions, North Amazon registers the highest expansion (2.1 million hectares), followed by Northeast Cerrado (1.9 million hectares) and Center West Cerrado (1.2 million hectares).

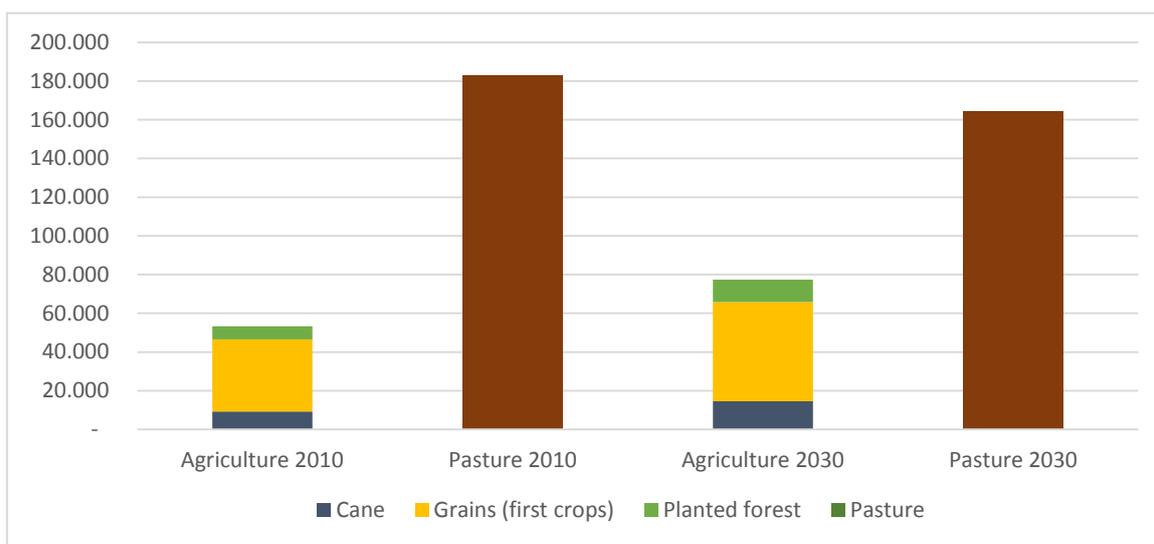


Figure 2: Agricultural and pasture areas (thousand hectares) in 2010 and 2030, for the Reference scenario

Source: from this study, using BLUM model and database.

Progressive scenarios

The policy analysis relies on the comparison of the Reference and alternative (Progressive) scenarios in 2030. The first aspect analyzed is the change in the industrial profile. Figure 3 shows the total sugarcane crush by class of mill in 2010 and in the different scenarios for 2030.

The PS1 and PS2 scenarios report significant changes in industry profile. The share of large mills with high tech cogeneration systems is evident in PS1. Most of the change in profile happens in Southeast region, where about half of the existing electric generation capacity could be retrofitted between 2010 and 2030. The change is also important in all other regions apart from Amazon (where no change in profile is assumed) and is less felt in Center West Cerrados, where the share of high tech is already significant in 2014. The PS2 scenario brings even more change in industry profile, once it assumes a novel technology. Regional changes are similar to PS1 scenario with the exception of Center West Cerrados (that only had limited straw recovery in 2014) and in Northeast coast, that has limitations to the adoption of straw recovery due to constraints in mechanical harvesting.

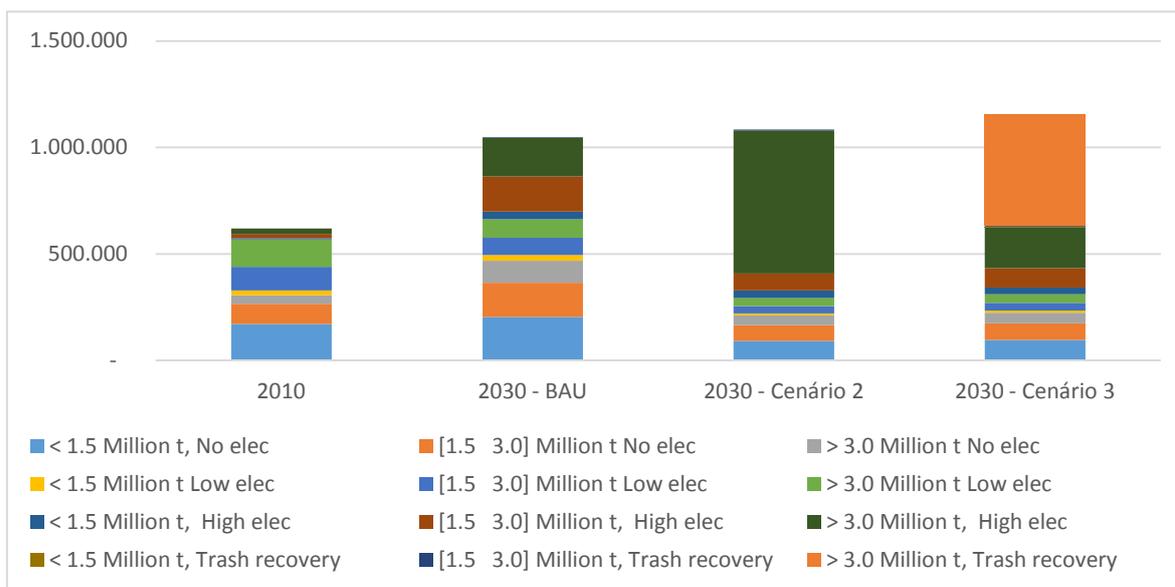


Figure 3: Crush of sugarcane by mill type in 2010 and 2030, according to the scenarios (thousand tonnes)

Source: from this study

As can be seen in Table 5, total crush has a small expansion from Reference to PS1 scenario (from 1,049 to 1,084 Mt per year, respectively). This expansion is intensified in PS2 scenario, reaching about 10% increase. Surplus electricity almost doubles between Reference and PS1 scenario. If trash recovery and burning becomes commercial, bioelectricity exports could reach almost 110 TWh in 2030 in the PS2 scenario, which is equivalent to all electricity generated in a country such as Netherlands or Norway³².

The indirect effects of surplus electricity commercialization into sugar and ethanol markets are of great interest and are also reported in Table 5. Incentives to bioelectricity, and the additional income, have some impact in the consumption of hydrous ethanol that expands by 3.3 billion liters in PS1 scenario. A similar, but much more intense effect is observed in PS2 scenario where it is assumed that the technological improvements in straw harvesting are largely disseminated. Hydrous consumption jumps 12 billion liters per year and total fuel ethanol consumption reaches 53.9 billion liters.

Table 5: Simulation results (supply and demand section)

Product	Variable	2010	2030	2030	2030
			Reference	PS1	PS2
Sugarcane	Crush for mills (Mt)	620	1,049	1,084	1,157
	Price (2015 R\$/t = 1)	1.09	0.93	0.90	0.84
	Production (Mt)	37.9	50.2	50.3	50.6
Sugar	Domestic Consumption (Mt)	10.7	13.0	13.1	13.2
	Ending Stocks (Mt)	1.5	2.9	2.9	3.0
	Net Trade (Mt)	27.5	37.2	37.2	37.4
	Price (2015 R\$/L =100)	0.98	1.21	1.19	1.18
Ethanol	Production (Mm ³)	27.4	53.5	56.2	61.9
	Hydrous consumption (Mm ³)	16.7	30.2	33.5	40.5
	Anhydrous consumption (Mm ³)	7.8	15.3	14.7	13.4
	Industrial consumption (Mm ³)	1.0	1.2	1.2	1.2
Electricity	Ending Stocks (Mm ³)	1.7	3.5	3.6	3.6
	Net Exports (Mm ³)	1.8	6.8	6.9	6.9
	Average Price (2015 R\$/MWh)	154.0	130.0	200,0	200,0
	Electricity surplus (TWh)	8.8	31.0	60.8	110.0

Source: from this study.

The changes in sugar and ethanol markets are a result of a typical shock in the sugarcane supply curve. At the Reference scenario market equilibrium is set at the intersection of supply and demand curves for sugar and ethanol considering all other factors constant. Higher electricity price and better technology leads to higher margins per hectare (cropped with sugarcane) for given sugar and ethanol prices. Sugarcane is then more competitive against other crops and expands, displacing sugar and ethanol supply curves. Considering a negative demand curve for sugar and ethanol, the displacement of the supply curve leads to lower prices, enabling higher demand.

The indirect effects of changing cogeneration technology have a higher impact in ethanol volumes when compared to sugar. Hydrous ethanol and gasoline are seen as perfect substitutes in the eyes of a flex-fuel vehicle (FFV) owner in Brazil, and so small changes in prices leads to significant swifts from gasoline to hydrous without changing total distance driven. Sugar has less direct substitutes and, as consequence, a supply

shock will reflect more in prices than volumes (see Supplemental Material – Appendix 2.7.3 – for graphical representation).

The indirect land use change of such policies is addressed in Table 6 as changes compared to the Reference scenario in 2030. The expansion of sugarcane in different regions (in PS1 case, more intense in Southeast and less in Center West Cerrados) explains the level of intensity of technological change in sugarcane sector. Amazon biome registers a reduction of sugarcane cropping compared to Reference scenario (5 and 21 thousand hectares, respectively, in scenarios PS1 and PS2), once expansion of production in other regions forced the sugar and ethanol prices down.

The results of PS1 show that sugarcane would expand predominantly over pasture and crops in all regions, but grains in Central-West Cerrados and North Amazon (see Table 6). The enlargement of the agricultural area in those regions is due to displacement of production from other regions, particularly Southeast and South. The potential for pasture intensification is large, as well as dynamics between 1st and 2nd crops of corn, and so only 13% of sugarcane expansion (432 thousand hectares) is actually reflected in total area expansion (56 thousand hectares).

Table 6: Changes in land use in 2030 compared to Reference scenario (1,000 ha)

Region	PS1				PS2			
	Cane	Annual	Pasture	Total	Cane	Annual	Pasture	Total
South	81	(35)	(46)	0	153	(57)	(95)	1
Southeast	218	(92)	(125)	2	353	(137)	(212)	4
Central-West Cerrados	35	15	(37)	13	672	(106)	(516)	49
Amazon Biome	(5)	26	(3)	18	(21)	90	(17)	52
Northeast Coast	43	(14)	(13)	16	(42)	18	17	(7)
Northeast Cerrados	60	(11)	(42)	7	144	(14)	(103)	26
Brazil total	432	(111)	(266)	56	1,258	(206)	(926)	126

Note: negative values in parenthesis.

Source: from the authors.

Sugarcane expansion in PS2 scenario is higher than PS1 (1,157 million tonnes versus 1,084 million tonnes; see Table 5). Differently from PS1, Central-West Cerrados is by far the leading region in terms of sugarcane expansion (53% of total), reflecting changes in technology profile and higher competitiveness against other crops. The additional profitability from electricity pushes sugar and ethanol prices down, so where there are constraints for enlarging surplus electricity generation there is also lower increase in sugarcane area (compared to Reference scenario). In the PS2 scenario, sugarcane area would be reduced both in Northeast Coast as in Amazon (42 and 21 thousand hectares, respectively). As consequence, grains expansion is lower in Center West Cerrados region due to increasing land competition with sugarcane. In addition, most of production (in tonnes) is redirected to 2nd crop of corn, and part displaced to the Amazon Biome and Northeast Coast regions. In this case, the Amazon Biome registers the highest expansion of agricultural frontier (52 thousand hectares in 20 years), closely followed by Center West (49 thousand hectares).

At a first look of the results, it may seem that either annual crops or sugarcane would expand over natural vegetation in Amazon and Center West region, but this is probably not true. A proper interpretation of the results requires understanding the land use dynamics within the regions. Several publications have demonstrated that sugarcane does not expand into natural vegetation³⁴, and that most of the deforested area in the Amazon is immediately occupied by pastures (not crops). The most likely dynamics is the displacement of pastures by sugarcane and grains at the regional scale.

The net indirect land use effect of biofuels is a polemic and interesting topic, as it cannot be measured, but only simulated using theoretical models. In this study, such effect can be easily communicated by calculating the ratio of the expansion of agricultural frontier related to total area for biofuels expansion (sugarcane expansion/total agricultural expansion). This effect is estimated at 13% and 10%, in the PS1 and PS2 scenarios, respectively. A comparison with other studies³⁵ would suggest that the figures between 8% and 15% are correct for sugarcane ethanol. Although not insignificant, this ratio is much smaller than the one referred in first studies that condemned biofuels because of potential iLUC effects³⁶.

GHGs emissions

The lifecycle impact analysis on GHGs emissions follows a consequential approach of the two Progressive scenarios, compared to Reference scenario in 2030. The scope of analysis includes displacement of fossil, electricity and gasoline (by bioelectricity and ethanol), emissions from additional production of sugar, ethanol and bioelectricity, and direct and indirect emissions due to land use change.

Carbon footprint of displaced electricity is calculated at the grid margin considering generation with natural gas in a combined cycle with 50.3% efficiency, which resulted 400 kgCO₂eq/MWh as the baseline emission factor.³⁷ As the baseline carbon footprint for electricity at the margin along about 15 years is uncertain, a sensitivity analysis was performed. The lowest figure would be 153 kgCO₂eq/MWh, corresponding to the emissions of a combined cycle burning natural gas, but with a CCS – Carbon Capture and Storage – system³⁸. The upper case would be 628 kgCO₂eq/MWh, figure that corresponds to electricity generation with natural gas in gas turbines, simple cycle, with 32% efficiency.³⁷

The GHGs mitigation in the transport sector was calculated as a direct function of changes in gasoline consumption between scenarios. It was assumed that each liter of automotive gasoline emits 2.98 kgCO₂eq (92.5 gCO₂eq/MJ) in the production and combustion phases³⁹.

Emissions of additional sugar and ethanol production were calculated using coefficients presented by Seabra and Macedo⁴⁰ for emissions from the agricultural, industrial and distribution phases. The estimation of direct and indirect LUC emissions followed the same methodology presented in the Regulatory Impact Analysis for the Renewable Fuel Standard⁹, which has emission factors calculated for the six regions addressed by the BLUM model⁴¹, and land use change patterns presented in Table 6.

The cumulative values for each category, from 2010 to 2030, are presented in Table 7. Positive numbers represent emissions whereas negative numbers indicate mitigation of GHGs emissions. Numbers between parentheses represent ranges of results of the sensitivity analysis.

Both scenarios present important contributions to the mitigation of GHGs emissions. The displacement of natural gas in PS1 compared to reference scenario sums 105 million t of CO₂eq, whereas the additional displacement of gasoline reaches 44

million tonne CO₂eq. The need for additional crush led to small additional emissions from sugarcane production and processing (12 million tCO₂eq as well as small additional emissions from LUC and iLUC (2 million tCO₂eq). The sensitivity analysis indicates a wide range of results (mitigation from 68 to 192 million tonne CO₂eq), but with actual contributions in both extreme cases. Additional mitigation in PS2 is more than double compared to PS1. Total mitigation estimated at 292 million tCO₂eq could even reach 424 million tonne CO₂eq considering the highest baseline for electricity. The net balance of emissions represents approximately 65% and 145% of the Brazilian transportation sector, in 2012, respectively⁴²; therefore additional mitigation from PS1 and PS2 are equivalent to 2013 annual emissions of countries like Belgium and Spain, respectively³³.

Table 7: Balance of GHGs emissions - comparison of the two Progressive scenarios vis-à-vis the Reference one (GtCO₂eq)

GHG source/mitigation (million t CO ₂ eq)	PS1 Vs Reference	PS2 Vs Reference
Bioelectricity	-105 (-40; -164)	-233 (-89; -365)
Gasoline substitution	-44	-105
Sugar and ethanol production	13	32
LUC + iLUC	2	14
Net balance	-132 (-68; -192)	-292 (-148; -424)

Source: Calculated by the authors, based on ^{37, 38, 39, 40, 41} and simulations of this paper.

Most of the benefits come from the bioelectricity generation, displacing natural gas, but significant mitigation also happens in the transport sector. Induced hydrous ethanol expansion in PS2 is equivalent to almost 80% of PS1 scenario net balance. Emissions from sugar and ethanol production are small relative to benefits, as expected. Although deforestation always generates significant emissions per hectare, the additional indirect effect of sugarcane expansion is small, leading to low LUC and iLUC emissions both in PS1 and PS2.

2.5 Conclusions

The aim of this paper was to understand the contributions of the adoption of highly efficient cogeneration technologies to meet Brazilian NDCs 2030 targets, evaluating its direct and indirect impacts in agricultural market, land use change and GHGs emissions. It is presented a methodology to analyze consequential impacts of policy and technological innovation in sugarcane sector, including direct and indirect effects. The method is based on an improved version of a partial equilibrium model (BLUM), which required identification of regional industry profile, trends and long-term simulations.

Identifying the industry profile across time is not an easy task, since individual statistics (costs, conversion factors, etc.) are not always available and are generally diffuse among several sources. The construction of the industry profile is therefore a first contribution from this paper and it is now available for additional studies on this theme.

The study departs from a Reference scenario where ethanol production reaches about 54 billion liters and 31 TWh in 2030. The reference scenario considers a tax differential in favor of ethanol compared to gasoline, reflecting the 2015 liquid fuels tax structure in Brazil that allows reaching the NDC production of ethanol. However, electricity surplus would be lower than the levels considered for the NDC proposal (76 TWh year⁻¹).

In the first alternative scenario (PS1), with better price signals for electricity, modern cogeneration technology is adopted and bioelectricity grows to 61 TWh year⁻¹, more than doubling electricity surplus compared to Reference. Although significantly improved, the electricity surplus is still lower than the expected output. In the PS2 scenario, results shows that including straw as fuel for cogeneration plants would lead to a surplus of 110 TWh year⁻¹. This scenario is a significant improvement towards meeting the NDC electricity target, once bioelectricity performs at higher levels compared to expected, allowing safer margins for other renewable sources that may underperform or fail. However, the large scale use of straw as fuel is still not commercial and technological developments are required.

It is possible to get additional findings regarding the indirect effects of such policies and technologies. Apart from the displacement of electricity generated at the margin of national grid, the large-scale surplus electricity production also helps to increase sectoral income, expanding sugar and ethanol production and, at the same time, to reduce sugar and ethanol prices. In the optimistic scenario (PS2), sugar and ethanol prices declined 9.1% and 2.3 %, respectively, whereas sugarcane production would expand about 108 million tonnes (about 15% of current production). Ethanol production expanded in 8.3 billion liters, as hydrous ethanol consumers would greatly benefit from the decline in ethanol prices. The indirect impacts of sugarcane expansion into natural vegetation would be limited to about 10% to 13% of the additional sugarcane area expansion, estimated at 432 and 1,258 thousand hectares, in PS1 and PS2, respectively.

About one third of the GHGs emissions mitigation due to policies that would foster bioelectricity would occur in the transport sector. The PS1 and PS2 scenarios would lead to additional mitigation of 134 and 296 million tonnes of CO₂eq until 2030, respectively. Sensitivity analysis indicates that the additional emission reduction could reach 424 million tonnes of CO₂eq in extreme case.

In summary, the findings of this paper strongly encourage policies that benefit bioelectricity in the sugarcane sector, including price signals and R&D (for reach higher use of sugarcane trash). Further, the consequential approach demystifies the concept that bioenergy indirect effects tends to increase GHGs emissions. Brazil has significant intensification potential (particularly pastureland and double cropping) and sugarcane ethanol is quite efficient in terms of energy production per hectare. The positive and synergic benefits can be huge and the effects on prices and production should be taken into consideration both by academics and by policy makers. However, it is worth to notice that the analysis departs from a Reference Scenario where tax structure already favors ethanol as main energy product in sugarcane sector.

Due to resources constrains and seeking objectiveness, this study focused on one specific NDC target and one specific (although promising) technology. Although authors are confident in the results and guidance of this paper, it should then understood as a small piece in a giant puzzle of knowledge necessary to deal with climate change threat. They strongly recommended that future studies analyses a broader scope of policies, technologies and sectors.

2.6 References

- (1) BRAZIL. Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at www4.unfccc.int/submissions/iNDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf. Accessed in August 2016.
- (2) MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy, Brazilian Energy Balance 2016, Year 2015 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro 2016. 292 p.: 182 ill. : 23 cm. CDU 620.9:553.04(81).
- (3) MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. BRAZILIAN MINISTRY OF ENERGY. O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Junho/2016. Available at <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>. Accessed in August 2016.
- (4) FAO (2012) Alexandratos, N. and J. Bruinsma. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome.
- (5) DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; SCANDIFFIO, M. I. G.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL, R. F.; BONOMI, A. Simulation of ethanol production from sugarcane in Brazil: economic study of an autonomous distillery. 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20. 2010.
- (6) UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. A bioeletricidade da cana em números – agosto de 2016. Available at: www.unica.com.br/documentos/documentos/. Access in August 2016.
- (7) MACEDO, I.; SEABRA, J. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: Sugarcane ethanol, contributions to climate change mitigation and environment. 2008.
- (8) LINERO. Aproveitamento da palha da cana de açúcar. Centro de Tecnologia Canavieira. 16º Seminário Brasileiro Agroindustrial. Ribeirão Preto – Outubro de 2015.
- (9) US-EPA. Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis; US Environmental Protection Agency: Washington, DC, Feb 3, 2010; p 1120.
- (10) GOUVELLO, CHRISTOPHE de. "Brazil low-carbon country case study." (2010). Available at <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US2014602315>. Access in august 2016.
- (11) ASSAD, EDUARDO.PINTO, HILTON S.; NASSAR, ANDRE.; LEILA HARFUCH.; FREITAS, SAULO.; FARINELLI, BARBARA.; LUNDELL, MARK..BACHION, LUCIANE CHIODI.; FERNANDES, ERICK C.M.. Brazil, 2015 Impactos das Mudanças Climáticas na Produção Agrícola Brasileira. World Bank, 2013.

- (12) MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Fundamentos para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC. Available at www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Bases_elaboracao_iNDC.pdf. Access in August 27, 2016.
- (13) NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; MOREIRA, M. R.; CHIODI, L.; ANTONIAZZI, L.A.; Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using Brazilian Land Use Model (BLUM). Report to the U.S. Environmental Protection Agency regarding the proposed changes to the Renewable fuel standard program. 2009. Available at: <http://www.iconebrasil.com.br/arquivos/noticia/1872.pdf>
- (14) PECEGE. Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2015. 73p. Relatório apresentado à Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto Campo Futuro. Also data from the same database from 2009 to 2011.
- (15) VAN DEN WALL BAKE, J. D.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; POOT, T.; WALTER, A. Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane Biomass and Bioenergy, 2009.
- (16) BONOMI ANTONIO; ADRIANO PINTO MARIANO; CHARLES DAYAN FARIAS DE JESUS; HENRIQUE COUTINHO JUNQUEIRA FRANCO; MARCELO PEREIRA CUNHA; MARINA OLIVEIRA DE SOUZA DIAS; MATEUS FERREIRA CHAGAS; OTÁVIO CAVALETT; PAULO EDUARDO MANTELATTO; RUBENS MACIEL FILHO; TASSIA LOPES JUNQUEIRA; TEREZINHA DE FÁTIMA CARDOSO. The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) 2011 report. Technological Assessment Program (PAT). Brazilian Bioethanol Science and technology laboratory. Campinas, 2012.
- (17) BONOMI, A., CAVALETT, O., PEREIRA DA CUNHA, M., LIMA, M.A.P. (Eds.). Virtual Biorefinery: An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization. 2016. p. 285. Springer International Publishing.
- (18) OLIVÉRIO, J. L. O estado da arte da tecnologia industrial – As usinas de açúcar e álcool. Internacional Agroenergy Congress, Teresina, 2007.
- (19) BRESSAN FILHO, A. A geração termoeétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil. 2011.
- (20) COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, Levantamento de safra. Available at <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=criterioSafra1>. Access in august, 2016.

- (21) UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Center South Brazilian production of sugar, ethanol, and sugarcane crush by mill. Personal communication. 2016.
- (22) PROCANA. Anuário da cana. Brazilian Sugar and Ethanol Guide. Guides from 2007 to 2015
- (23) MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy. Time series of electricity exported by sugarcane mill. 2011. Available at: <http://www.mme.gov.br/mme>
- (24) IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Agrícola Municipal. 2011. Available at: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2009/default.shtm>
- (25) LEAL, M R L. V. (2010) Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. Em CORTEZ (Corrd) Bioetanol de cana-de-açúcar P&D para produtividade e sustentabilidade. Ed. Blusher. P. 561-575.
- (26) MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., & SILVA, J. E. (2008). Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass and bioenergy, 32(7), 582-595.
- (27) CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento - Diretoria de Política Agrícola e Informações – Superintendência de Informações do Agronegócio. A Geração Termelétrica com a queima do bagaço de cana de açúcar no Brasil. Análise do desempenho da safra 2009-10. 2011
- (28) MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy, Plano Decenal de Energia 2024. Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.
- (29) INTERNATIONAL MONETARY FUND – IMF. World Economic Outlook Database WEO, Update, January 2016. Available at. www.imf.org. Access in February 2016.
- (30) OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015), OECD-FAO Agricultural Outlook 2015, OECD Publishing, Paris. Available at, http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en.) ISBN 978-92-64-23203-7.
- (31) IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2015 (Released on 10 November 2015).
- (32) IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Statistics. Available at <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>. Access in august 2016.
- (33) UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. (2015). National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2013. United Nations Office at Geneva, Geneva (Switzerland).

- (34) ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. (2012). Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. *Sustainability* 2012, 4, 574-585 (doi:10.3390/su4040574)
- (35) VALIN, H., PETERS, D., VAN DEN BERG, M., FRANK, S., HAVLIK, P., FORSELL, N., E SCHMIDT, E. (2015). The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts. European Commission Ref. Ares (2015)4173087. Available at https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf
- (36) SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOKGOZ, S.; HAYES, D.; YU, T.-H. (2008) Supporting Online Materials for: Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land Use Change. *Science*, 1151861
- (37) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, Guidelines, Chapter 2. 2006.
- (38) CALIFORNIA ENERGY COMMISSION (2014). Assessment of natural gas combined cycle plants for carbon dioxide capture and storage in a gas-dominated electricity market. Final Report.
- (39) CAVALETT, O; CHAGAS, M.F.; SEABRA, J.E.A.; BONOMI, A. (2012). Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *Int J Life Cycle Assess.* DOI 10.1007/s11367-012-0465-0
- (40) SEABRA, J. E., E MACEDO, I. C. (2011). Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, 39(1), 421-428.
- (41) HARRIS, N. L.; GRIMLAND, S.; BROWN, S. (2009) Land Use Change and Emission Factors: Updates since Proposed RFS Rule. Report submitted to EPA..
- (42) MCTI - MINISTRY OF SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION (2014). Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2º edição. Available at: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf
- (43) AGRAFNP. Agrianual 2011 (2011). Anuário da agricultura brasileira.

2.7 Supplementary Material

2.7.1 Appendix: Data for regional profile of the sugarcane sector

Table 8: Regional agricultural characteristics of sugarcane production (2010/11 harvest season)

Region	Yield (TRS/t cane)	Yield (t/ha)	Operational cost (R\$/ha)	Operational cost (R\$/t cane)	Share of national production
South	137	74	2737	37	8%
Southeast	142	83	2994	36	71%
Center West Cerrado	142	81	3071	38	8%
North Amazon	126	66	2552	39	1%
Northeast Coast	132	55	2486	45	10%
Northeast Cerrado	130	64	2975	46	2%
Brazilian average	141	78	2924	38	100%

Note: Operational costs include field costs and transportation of sugarcane to the mill. Land rent and opportunity costs of capital are not considered.

Source: Original data from ^{13, 20, 23, 38}, elaborated for this study using a simplified version of the Sugarcane Virtual Sugarcane Biorefinery (agricultural tool). See 16, 17 for details.

Table 9: Total electricity exported by the sugarcane mills (TWh)

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Electricity sold	1.1	1.3	3.2	4.4	5.9	8.8	9.9	12.1	16.0	19.4	20.4
Annual growth		18%	146%	38%	33%	50%	13%	22%	32%	21%	5%

Source: ^{6, 21, 23} and from the authors.

2.7.2 Appendix: Time series of the recent industry profile

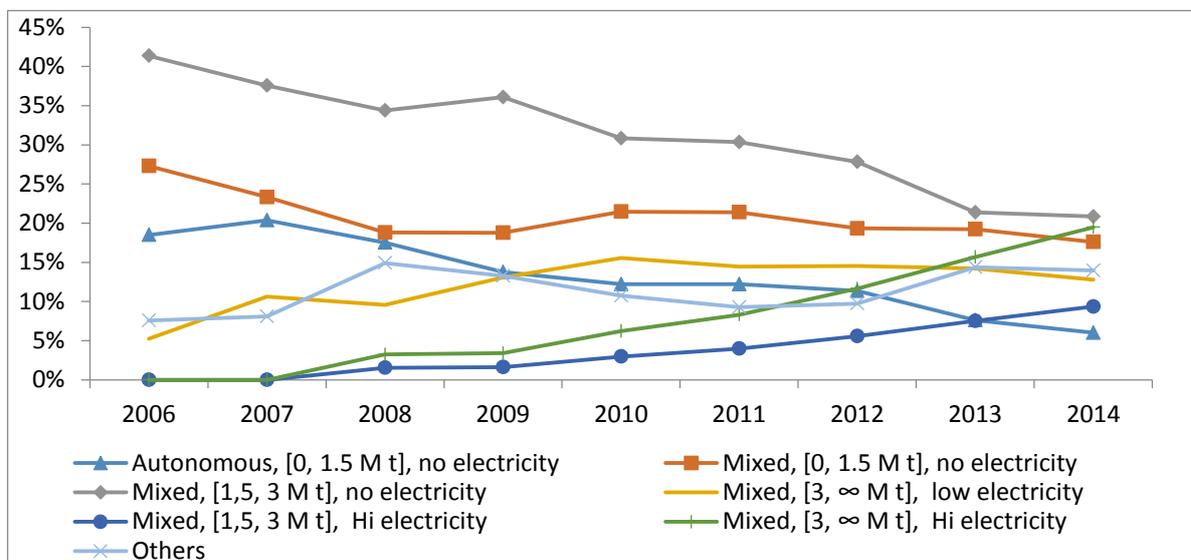


Figure 4: Sugarcane technological profile for the South region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

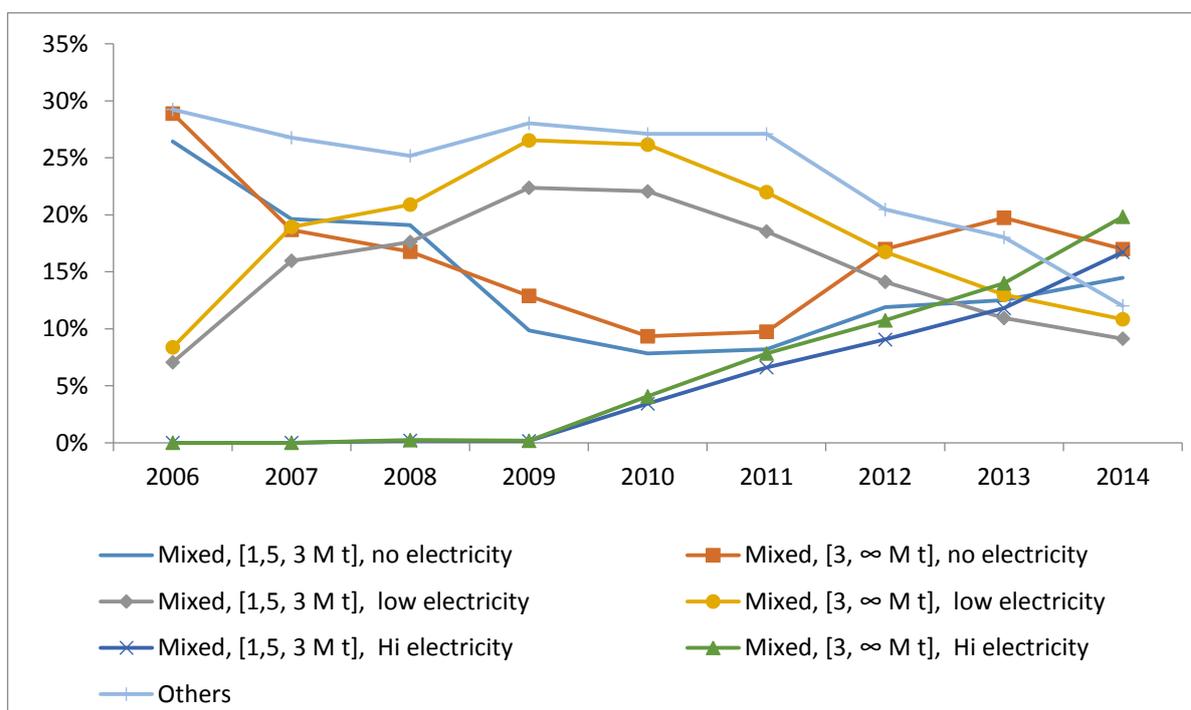


Figure 5: Sugarcane technological profile for the Southeast region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

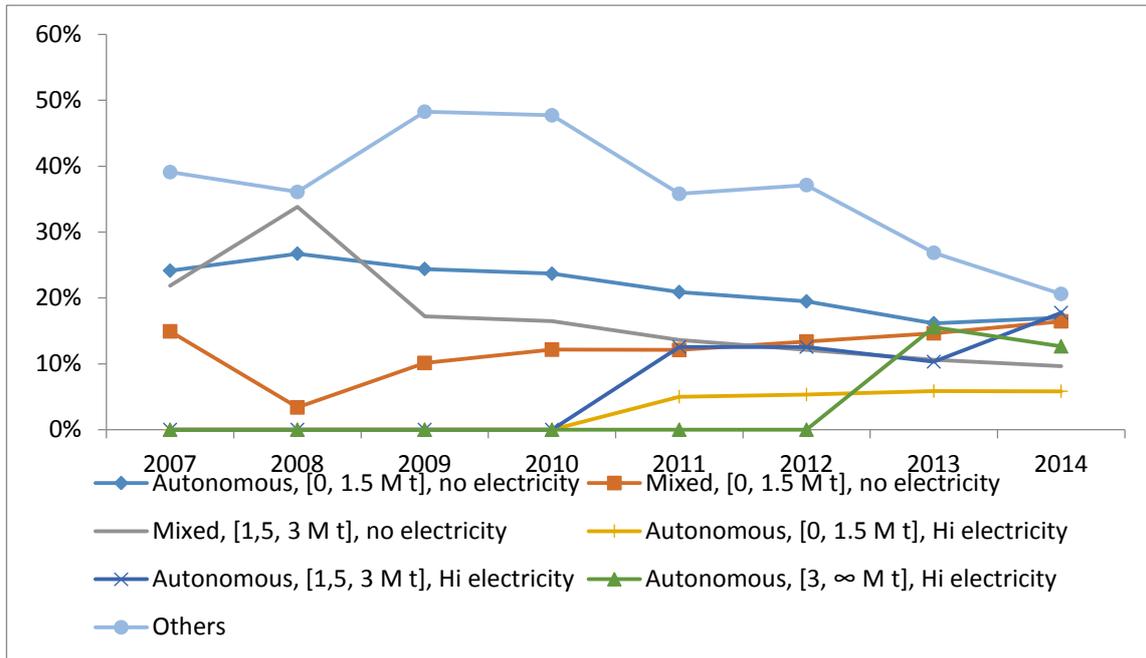


Figure 6: Sugarcane technological profile for the Center West Cerrado region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

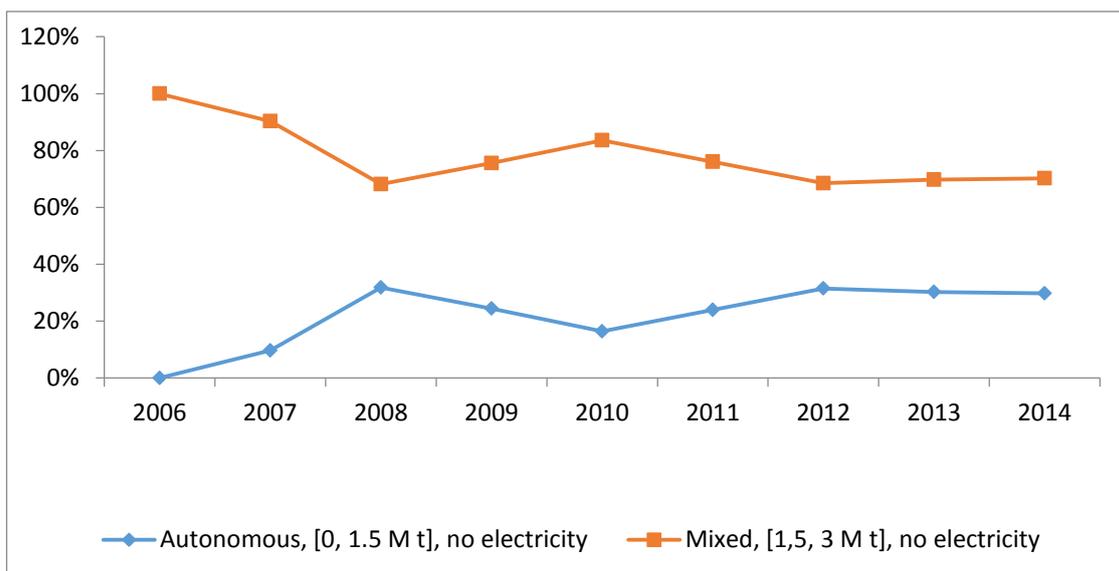


Figure 7: Sugarcane technological profile for the North Amazon region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

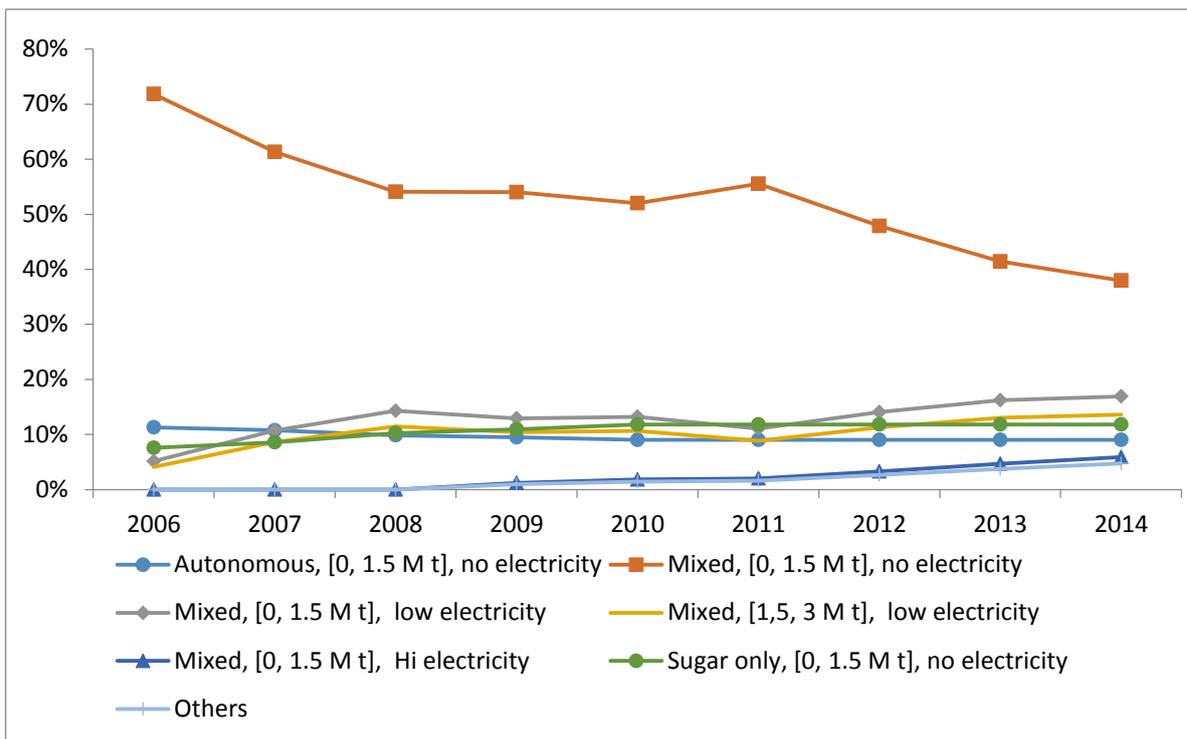


Figure 6: Sugarcane technological profile for the Northeast Coast region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

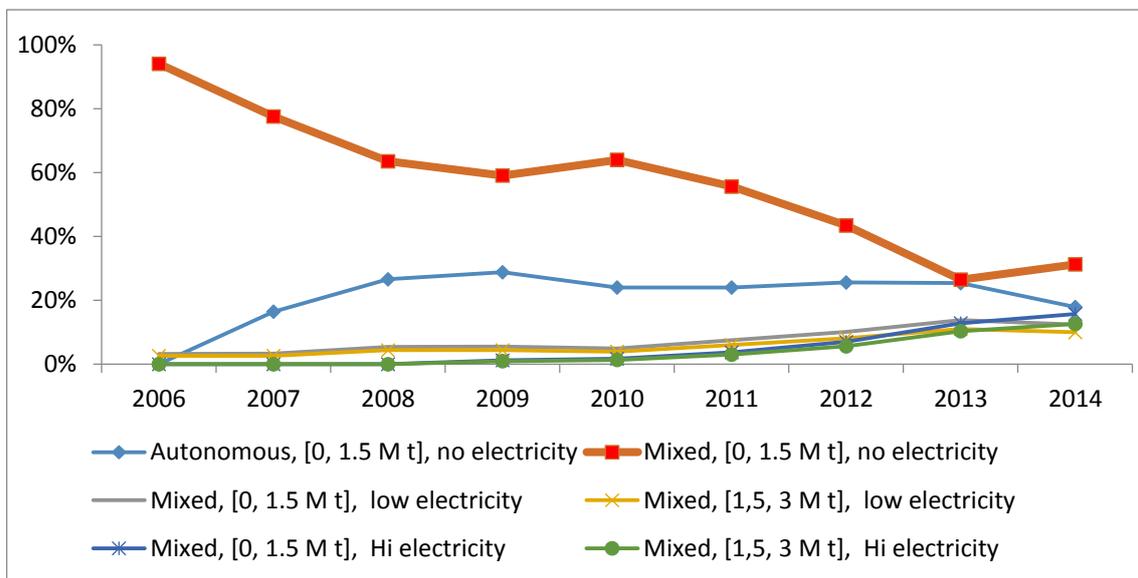


Figure 7: Sugarcane technological profile for the Northeast Cerrado region

Source: From this study, using data from ^{21, 23, 24, 40, 41}

2.7.3 Appendix: Dynamics of bioelectricity indirect effects (graphic representation)

The graph below represents the dynamics of a typical shock in the supply curve. Considering the original supply curve S and the demand curve D_a , the market equilibrium is set at the intersection of those two curves (point e , quantity q_0 and price p_0). When other factors change, such as decrease in costs (with higher profitability for the same price due to additional income from electricity), producers become willing to sell the same amount of products for the same price, displacing the supply curve to S' .

For the same demand curve (D_a), the new equilibrium is reached at the point $e'1$ (quantity q_1 and price q_1), with a lower price and higher production. If, for the same supply, the demand is more inelastic to price, as in D_b , the new equilibrium after the shock in the supply curve is $e'2$ (quantity q_2 and price p_2). From the graph, it is evident that the more elastic demand curve (hydrous ethanol) has a higher impact on quantity ($q_1 - q_0$ compared to $q_2 - q_0$) whereas the more inelastic (sugar) curve has a higher impact on prices ($p_1 - p_0$ compared to $p_2 - p_0$). The effects of a supply shock (due to changes in industrial technology) are relatively more significant on the quantity of hydrous ethanol whereas the price of sugar is affected in a larger extent.

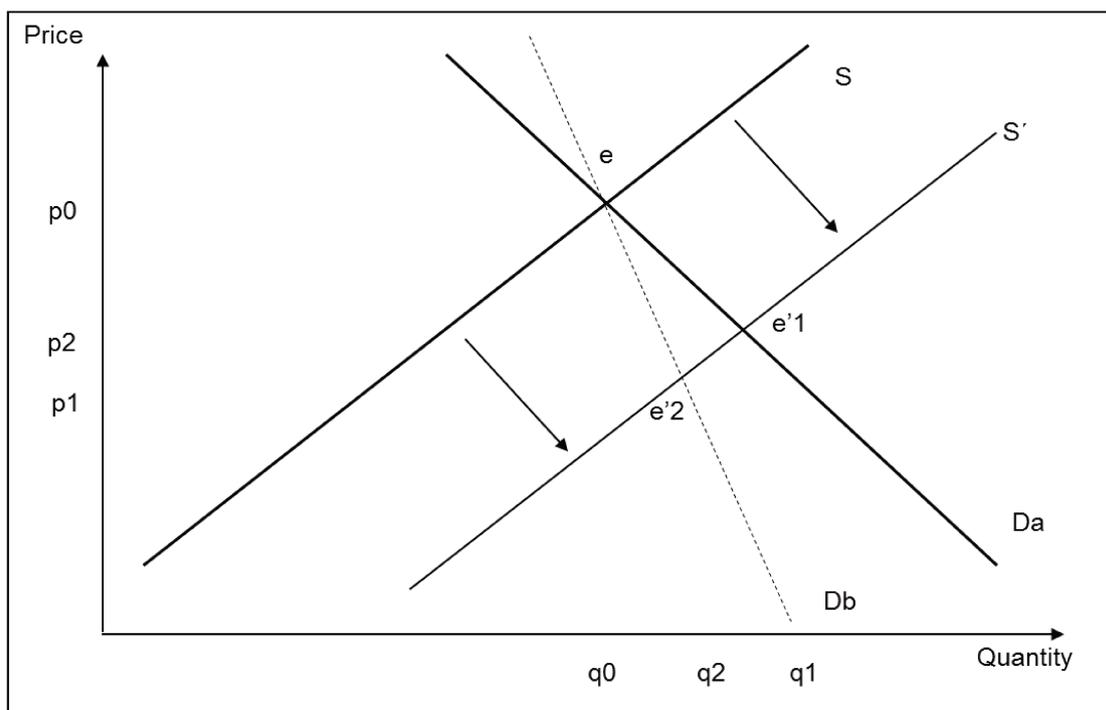


Figure 8: Dynamics of bioelectricity indirect effects

2.7.4 Appendix: Data used for land use GHG calculations

Table 10: Net area variation by land type (1000 ha) – results for 2030

Region	Annual	Sugarcane	Pasture	Total land
South	-11	33	-22	0.10
Southeast	5	137	-141	0.56
Central-West Cerrados	3	18	-19	1.95
Amazon Biome	2	-2	10	10.42
Northeast Coast	-5	17	-8	4.06
Northeast Cerrados	0	3	-3	0.80
TOTAL	-6	206	-183	17.88

Source: From this study, results from BLUM model.

Table 11 Land use change by land type (1000 ha) – results for 2030

Region	Annual to Perennial	Pasture to Perennial	Pasture to Annual	Natural to Annual	Natural to Perennial	Natural to Pasture
South	11	22	-	-	0	-
Southeast	-	137	4	1	-	-
Central-West Cerrado	-	18	1	2	-	-
Amazon Biome	-2	-	-	0	-	10
Northeast Coast	5	8	-	-	4	-
Northeast Cerrado	-	3	-	0	1	-
TOTAL	14	188	5	3	5	10

Source: from this study, following EPA-ICF methodology

Table 12: Emission factor in 30 years by type of land use change (tonne CO₂eq /ha)

Region	Annual to Perennial	Pasture to Perennial	Pasture to Annual	Natural to Annual	Natural to Perennial	Natural to Pasture
South	-144	14	163	214	60	45
Southeast	-106	17	130	175	59	39
Central-West Cerrado	-115	15	133	196	74	55
Amazon Biome	-118	19	143	505	354	331
Northeast Coast	-97	18	116	146	44	25
Northeast Cerrado	-99	20	124	187	79	58

Source: ⁹

3 AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO POTENCIAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA¹¹

3.1 Resumo

O Acordo de Paris, aprovado em dezembro de 2015 na 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (COP21), é um marco global nos esforços de combate às mudanças do clima. Nele, 195 países e a União Europeia apresentaram suas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC, em inglês), identificando ações para conter o aquecimento global. Pouco mais de 11 meses depois, 55 países (representando pelo menos 55% das emissões mundiais), ratificaram o acordo, tornando as intenções em compromissos e as iNDCs em Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs).

A NDC brasileira propõe ambiciosas reduções de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), que devem ser alcançadas por meio de ações adicionais àquelas já em curso no Brasil, com destaque para biocombustíveis, florestas e uso da terra, e energia (expansão de renováveis na matriz, ganhos de eficiência, e expansão de renováveis não hídricas na geração elétrica).

O presente estudo avalia estratégias para que as NDC de biocombustíveis sejam cumpridas, tendo em consideração opções tecnológicas (etanol 2G, cogeração de bioeletricidade através do bagaço de cana-de-açúcar e maximização da geração elétrica com recolhimento e uso da palha) e introdução do Custo Social do Carbono (CSC) na estrutura de custos da gasolina. Uma versão melhorada do Modelo de Uso da Terra para a Agricultura Brasileira (BLUM) foi a principal ferramenta utilizada, o que permitiu simular níveis de produção de etanol (total e 2G) e vendas de excedentes de bioeletricidade, e suas respectivas emissões, incluindo efeitos diretos e indiretos de uso da terra. A combinação de três tecnologias e duas estruturas de formação de preço da

11 Autores: Marcelo M. R. Moreira, Arnaldo C. S. Walter, Marcelo P. Cunha, Willian J. Kimura, Leila Harfuch, Luciane C. Bachion.

gasolina A formaram um conjunto de seis cenários que foram comparados com os valores que serviram de base para a formulação da iNDC.

Os resultados indicam que, embora contribuam para aumento da participação das energias renováveis frente às fósseis, as políticas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) muito provavelmente não serão suficientes para o cumprimento das NDC conforme planejado. Por outro lado, políticas que permitem incorporar o custo do carbono no preço da gasolina tendem a ter impactos muito mais significativos. Somente a combinação de políticas de P&D e a introdução dos custos de carbono na estrutura de preços da economia é capaz de tornar a NDC factível, podendo inclusive os resultados ir até além do previsto.

Por fim, a análise de ciclo de vida (quanto às emissões de gases de efeito estufa) reforça que (i) os benefícios ambientais (mitigações) da expansão do etanol de cana-de-açúcar são muito maiores que seus custos (emissões), mesmo considerando efeitos diretos e indiretos do uso da terra; (ii) existem efeitos sinérgicos significativos entre etanol e bioeletricidade (via rentabilidade) que são positivos do ponto de vista das emissões evitadas; (iii) a ausência de políticas que direcionem a expansão do etanol 2G para redução de consumo de gasolina pode levar ao subaproveitamento do potencial ambiental dessa tecnologia.

3.2 Introdução

O Acordo de Paris, aprovado em dezembro de 2015 na 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (COP21), é um marco global nos esforços de combate às mudanças do clima. Nele, 195 países, mais a União Europeia, começaram a definir como a humanidade enfrentará o aquecimento global nas próximas décadas. Os objetivos do Acordo são: limitar o aumento da temperatura média global; aumentar a capacidade de se adaptar aos efeitos das mudanças do clima e; criar fluxos financeiros para fomentar ações de mitigação, adaptação e desenvolvimento (UNFCCC, 2015).

A proposta foi ratificada por 55 países (que representam pelo menos 55% das emissões globais de GEE), passando a vigorar oficialmente como acordo global em

novembro de 2016, com período de implementação se iniciando em 2020 (UNFCCC, 2016). As outrora “Pretendidas” Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC) deixam de ser uma intenção e passam a valer como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), devendo os países signatários desenvolver urgentemente mecanismos para sua efetiva implementação.

A NDC brasileira apresentou ambiciosas propostas de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Brasil, 2015b). A estratégia para o cumprimento das metas se estrutura sobre pilares que amplificam as ações de sucesso que já estão em curso, a saber: biocombustíveis, uso da terra e energias renováveis. Dentre outros, destacam-se as metas de expansão de bioenergia para representar 18% da matriz energética; alcançar 45% de energias renováveis na matriz energética; expansão das fontes renováveis, além da hidroeletricidade, com eólica, solar e biomassa, para que representem pelo menos 23% da geração elétrica em 2030; além dos esforços de redução/compensação de emissões de uso da terra, promoção da agricultura de baixo carbono, aumento da eficiência energética e ações no setor industrial e de transportes (Brasil, 2015b).

O detalhamento das bases consideradas para a fundamentação da NDC (EPE, 2016a) revela que o desafio para o setor sucroenergético é enorme. A produção de etanol de primeira geração deverá crescer 86% entre 2014 e 2030, atingindo 54 bilhões de litros no último ano. O etanol de segunda geração (2G) também deve se tornar realidade em escala comercial, com a produção atingindo 2,5 bilhões de litros. Já a geração elétrica com biomassa deverá saltar de 18 para 76 TWh (320%) no mesmo período. No Brasil, o grande potencial de geração de eletricidade é com uso da biomassa residual da cana.

O desafio contrasta com o passado recente do setor, que observou perda de competitividade perante a gasolina (devido, em grande parte, a redução de tributação na gasolina aumento do endividamento e desafios na produtividade) levando ao fechamento de 82 unidades produtoras desde 2011. (EPE, 2016b). Por sua vez a expansão da geração de eletricidade com gás natural (que saltou de 5% para 14% entre 2005 e 2015) (EPE, 2016c) demonstra a necessidade de se planejar o crescimento da geração elétrica para conter a expansão de uso de fontes não renováveis na matriz elétrica.

Não estão claras as bases (condições de mercado, tributárias e de financiamento) que levarão ao cumprimento da NDC. Tampouco foram consideradas as características da dinâmica de uso do solo que balizam a expansão da cana-de-açúcar, assim como os possíveis efeitos indiretos do setor sobre vegetação nativa, como recomendado em IPCC (2014).

Torna-se, assim, urgente a elaboração de cenários de expansão do setor sucroenergético que detalhem seus fundamentos, identifiquem principais condicionantes e impactos diretos e indiretos. Assim, colocam-se as seguintes perguntas:

- Para o Brasil, quais os potenciais de produção e consumo dos principais produtos sucroenergéticos até 2030?
- Quais as ações (regulações, desenvolvimento tecnológico, entre outros) que poderiam levar ao cumprimento das metas NDC?
- Quais os resultados em termos de emissões e mitigação de GEEs, considerados inclusive a mudança do uso da terra e os efeitos indiretos?

3.3 Objetivo

O objetivo deste estudo é analisar expansão do setor sucroenergético sob diferentes políticas que objetivam o cumprimento das NDCs referentes aos biocombustíveis, tendo em consideração seu entorno, sua natureza agro e seus efeitos indiretos de uso da terra. Para isso são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar o cenário tecnológico e regulatório atual e caracterizar um cenário de referência para expansão do setor sucroenergético;
- Identificar e qualificar os instrumentos (foco em tecnologias e políticas) que possam alterar o cenário de referência;
- Simular cenários prospectivos e compará-los com os níveis de referência almejados pela NDC;
- Comparar as contribuições associadas a cada cenário quanto à redução de emissões de GEEs, incluindo efeitos diretos e indiretos de uso da terra.

3.4 O cenário tecnológico e regulatório atual e principais alternativas

Os principais fatores determinantes da expansão ou estagnação da produção do etanol podem ser agrupados em três grandes categorias: (i) a demanda potencial por combustíveis da frota de veículos leves, (ii) a expectativa de risco e rentabilidade de usinas e produtores de cana-de-açúcar frente às demais opções de investimento; e (iii) a alta sensibilidade da demanda do etanol hidratado em relação à gasolina (a decisão é do consumidor, principalmente em função dos preços relativos) (Satolo e Bacchi, 2009; Bressan Filho, 2010; Santos et al., 2015; Rodrigues e Bacchi, 2016).

A demanda potencial (item i) é em grande parte definida pela renda per capita (principal definidora da taxa de motorização), pela tecnologia automotiva, e por políticas de mobilidade (ANFAVEA, 2014; EPE, 2016b). Tais variáveis são de extrema relevância, mas sua definição depende de contextos variados, que fogem ao escopo deste estudo. As principais propostas para retomada da expansão do setor sucroenergético, e aumento do consumo de biocombustíveis vis-à-vis combustíveis fósseis, focam em ações quanto aos itens ii e iii. As próximas seções darão destaque a dois elementos de amplo debate internacional para os biocombustíveis, sendo esses a inovação tecnológica e a precificação do carbono.

3.4.1 Tecnologias para o etanol de cana-de-açúcar

Diferentemente de outros biocombustíveis, praticamente toda a energia necessária para a produção industrial de etanol de cana-de-açúcar vem do aproveitamento da própria biomassa, sob a forma de bagaço. O bagaço é a fibra residual da cana-de-açúcar que sobra ao final dos processos de moagem da cana-de-açúcar e extração do suco. Na maioria dos casos o bagaço disponível é totalmente usado como combustível em sistemas de cogeração, para produção de eletricidade e de vapor, que são usados na

produção de etanol de 1ª geração e açúcar. Atualmente uma fração significativa das usinas já adota sistemas de cogeração mais eficientes, que permitem a venda de excedentes de energia elétrica à rede.

Com o advento dos leilões de energia elétrica, o setor sucroenergético passou a incorporar a bioeletricidade como o terceiro produto dentre suas principais fontes de recursos, atualizando o modelo de negócios padrão do setor (Granville et al., 2009). A cogeração com bagaço para a venda de eletricidade é uma tecnologia madura, sendo adotada em praticamente todas as novas unidades industriais (Seabra e Macedo, 2011). A venda de bioeletricidade pelo setor sucroenergético saltou de pouco mais de 1 TWh em 2005 para mais de 20 TWh em 2015 (UNICA, 2016). Embora seja impressionante, o resultado ainda é muito inferior ao seu potencial técnico (EPE, 2015a), uma vez que um percentual significativo de usinas ainda não investiu para reformar os sistemas existentes ou interligar as usinas à rede (para a venda de excedentes).

Historicamente a palha e as pontas da cana-de-açúcar têm sido queimadas nos tradicionais sistemas de colheita manual. Com a substituição da colheita manual pelo sistema de colheita mecanizado¹², a palha passou a ser deixada no campo, e a camada resultante protege o solo da erosão e evita o desenvolvimento de ervas daninhas. Considerada toda a disponibilidade, tal biomassa, porém, representa cerca de um terço de toda energia da cana-de-açúcar (similar às parcelas do bagaço e do caldo) e, simplificadamente, suas características físicas e químicas se assemelham ao bagaço. Ela pode ser assim utilizada como combustível adicional para suprir os sistemas de cogeração, ou até mesmo pode ser utilizada como matéria prima para a produção de etanol 2G. Sua utilização na área industrial traz grandes oportunidades de melhoria da performance energética do setor (Leal et al., 2013).

Embora ainda haja desafios a serem vencidos tanto no recolhimento quanto no uso de maiores parcelas da palha como combustível (e.g., aprimoramento do sistema de colheita, limpeza da cana-de-açúcar, armazenamento e controle de problemas operacionais dos geradores de vapor), frações da palha já são recolhidas e usadas como combustível nas unidades industriais. O aumento da disponibilidade de combustível para sistemas de cogeração modernos permitirá a extensão da geração termoeletrica

¹² Com a expansão da colheita mecanizada - que já atinge mais de 90% das usinas da região Centro-Sul do Brasil (UNICA, 2015).

para os meses de entressafra, levando a maiores excedentes de eletricidade vendidas à rede (Cardoso et al., 2013; Dias et al., 2013; Linero, 2015). Nas condições atuais o recolhimento de palha se torna rentável a níveis de preço da eletricidade excedente em torno de R\$ 200/MWh, já considerando custos operacionais e investimentos (Linero, 2015).

O recolhimento de 40 a 50% da palha disponível no campo (o que, estima-se, é suficiente para manutenção das funções agrônômicas benéficas da palha) pode elevar os excedentes de eletricidade para 130 a 200 kW/t cana. Esse valor pode representar significativo aumento da eletricidade gerada em relação à situação convencional em que apenas o bagaço é utilizado como combustível (Seabra e Macedo, 2011; Dias et al., 2013). No longo prazo, a geração pode ser ainda maior, isso no caso de disponibilidade comercial da tecnologia que envolve gaseificação da biomassa e emprego de ciclos com turbinas a gás (Milanez et al., 2015).

Ao aproveitar a biomassa lignocelulósica (entendida como residual), o etanol 2G aumenta a produção do etanol por tonelada de cana-de-açúcar, reduz a necessidade de matéria-prima e, conseqüentemente, de área agrícola para produção de biocombustíveis. Por causa da necessária redução dos potenciais impactos ambientais quando da produção de biocombustíveis, o etanol 2G tem gerado grande interesse em diferentes partes do mundo, sendo alvo de políticas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) no Brasil, EUA e União Europeia. Entretanto, os resultados efetivos até o momento estão muito aquém do que era previsto.

Embora a eficiência teórica do processo de conversão do material lignocelulósico em etanol seja relativamente bem conhecida, sua eficiência efetiva e os custos em escala industrial ainda são incógnitas. A eficiência efetiva depende da quantidade de material lignocelulósico disponível para conversão em etanol (bagaço e palha), da geração e consumo de energia dos processos e das eficiências da hidrólise e da fermentação. Já os custos das poucas unidades em operação comercial não são divulgados sem restrições.

Na literatura são mencionadas projeções de eficiências de produção de etanol 2G entre 181 a 350 l/t material lignocelulósico seco, dependendo do cenário considerado e do horizonte de estimativa (curto, médio ou longo prazo). Convertendo em litros de etanol 2G por tonelada de cana-de-açúcar moída, os valores variam entre 19 e 37 litros

de etanol 2G por tonelada de cana-de-açúcar (Seabra e Macedo, 2011; Bonomi et al., 2012; Dias et al., 2013; Milanez et al., 2015)¹³.

Sistemas de produção 2G integrados a usinas de etanol de primeira geração, com a adição do recolhimento de palha, tendem a ter custos de produção de etanol mais baixos, uma vez que podem compartilhar estruturas comuns aos dois processos (Milanez et al., 2015; IEA-RETD 2016; Dias et al., 2013; Seabra e Macedo, 2011). Na literatura, o investimento em projeto novo tem valores entre 342 e 418 reais por tonelada de cana-de-açúcar em instalações 2G integradas a usinas que produzem etanol de primeira geração (Milanez et al., 2015; Dias et al., 2013). Entretanto, também na literatura foram encontradas tanto expectativas variadas para produção de etanol 2G em 2030, abrangendo o intervalo de 0,2 e 10 bilhões de litros (UNICA, 2015; BNDES, apud IEA-RETD 2015).

No Brasil, apesar da construção das primeiras plantas em escala industrial, em grande parte resultado do incentivo governamental a PD&I, como o Plano de Apoio Conjunto à Inovação Tecnológica Agrícola no Setor Sucroenergético – PAISS, ainda é difícil traçar cenários de longo prazo para o etanol 2G. Embora não se conheça detalhes, devido a segredos tecnológicos, as duas unidades construídas em escala comercial enfrentam dificuldades operacionais superiores ao inicialmente esperado (Novacana, 2016), e a curva de aprendizado deve ser mais lenta que alguns autores consideram. É esperado que a produção de etanol 2G só será significativa a partir de 2023. (EPE, 2016a).

3.4.2 Precificação do carbono

A precificação de carbono, incluindo a adoção de taxas sobre combustíveis fósseis, é uma das principais alternativas para atingir reduções significativas de emissões de GEEs no curto e médio prazo. Cerca de 40 países e 23 governos subnacionais já colocaram ou planejam sistemas de precificação de carbono, e aproximadamente metade das

¹³ Valores apresentados na literatura consultada. Quando o valor do etanol 2G não estava segregado, os valores foram estimados com base na diferença entre a produção 2G e a produção 1G.

submissões nacionais ao acordo de Paris fazem referência a tais mecanismos (Banco Mundial, 2016).

O preço de combustíveis fósseis é comumente subestimado por não contemplar custos referentes ao aquecimento global, poluição do ar e congestionamentos (Parry et al., 2014). O Custo Social do Carbono (CSC) tem se tornado uma referência cada vez mais robusta para estimar os danos econômicos causados pela emissão de GEE na atmosfera e já é implementado em diversos países e por instituições multilaterais para balizar políticas ambientais.

O CSC (usualmente estipulada em USD/ tonelada CO₂eq) corresponde ao dano adicional que uma tonelada de GEE emitida em determinado ano causará nos anos seguintes, enquanto permanecer na atmosfera. Embora a efetiva quantificação do CSC seja extremamente complexa, deve-se dar destaque aos esforços empreendidos pelo grupo interagências dos EUA que, tem como mandato aprimorar modelos para estimativas CSC, de modo que o mesmo seja aplicado nas análises de custo benefício para elaboração legislações americanas (USEPA, 2015).

Grande parte dos prejuízos da emissão de GEE em determinado momento ocorrerão no futuro, décadas, ou até mesmo séculos após sua emissão. A contabilidade do custo de carbono é então calculada pelo valor presente líquido dos prejuízos futuros. Assim, a definição do CSC é altamente dependente das taxas de desconto intertemporal utilizadas. Taxas de desconto mais altas geram estimativas de CSC mais baixos e taxas mais baixas geram estimativas mais altas. As taxas de desconto mais adequadas para utilização em políticas públicas são objeto amplo debate, não havendo consenso científico sobre o assunto.

Na modelagem, há diferentes possibilidades de premissas possíveis (trajetórias de crescimento, novas tecnologias, etc.), assim como diferentes interações entre os modelos (energéticos, climáticos e de estimativa de danos), que podem gerar resultados bastante distintos. Para lidar com tais dificuldades, são assumidas distribuições de probabilidades para as premissas e elaborados de histogramas de probabilidades de CSC obtidos pelas médias dos resultados diferentes modelos (IAWG, 2016).

Há ainda a perspectiva de que, em trajetórias mais altas de concentração de GEE na atmosfera, é razoável se considerar probabilidades pequenas (mas não inegáveis) de eventos catastróficos, que aumentam consideravelmente o CSC (Weitzman, 2014;

IAWG, 2016). Recomenda-se assim que as políticas considerem valores mais altos de CSC, que seriam justificados pelo aumento da temperatura do planeta acima do esperado. Dessa maneira o IAWG reporta uma serie temporal das estimativas médias do CSC para taxas de desconto de 5%, 3%, 2,5% e para o 95° percentil (assumindo 3% de desconto) (IAWG, 2016).¹⁴

Para o ano de 2016, o valor médio das estimativas do CSC são de 13, 44 e 67 USD/ tonelada de CO₂eq, para taxas de desconto de 5%, 3%, 2,5% e para o 95° percentil (assumindo 3%) respectivamente. Há ainda outros fatores que não foram incluídos nessas estimativas (tais como emissão de gases tóxicos), e que podem resultar valores mais altos (IPCC, 2014; USEPA, 2015).

O CSC de combustíveis no Brasil pode ser calculado pela equação (1), sendo necessários identificar os parâmetros (a), (b), (c) e (d).

$$\frac{a \text{ gCO}_2 \text{ eq.}}{\text{MJ}} \times \frac{b \text{ MJ}}{\text{l}} \times \frac{1 \text{ tCO}_2 \text{ eq.}}{1.000 \text{ gCO}_2 \text{ eq.}} \times \frac{c \text{ US\$}}{\text{tCO}_2 \text{ eq.}} \times \frac{d \text{ R\$}}{1 \text{ US\$}} = \text{CSC R\$/l} \quad (1)$$

Os valores de emissão de GEE por unidade de energia (a) e intensidade energética (b) dos combustíveis fósseis são relativamente conhecidos e podem ser encontrados com certa facilidade na literatura específica.

Como acabamos de descrever, não há consenso na literatura quanto aos valores mais adequados para o CSC (c), recomendando-se considerar os quatro valores publicado em IAWG (2016) nas análises de custo benefício. A média dos quatro indicadores para CSC é assim uma opção pra evitar valores extremos (método usado utilizado pelo IAWG para suavizar valores extremos dos modelos).

A taxa de câmbio (d) apresenta grande volatilidade e é difícil assumir um único valor. De maneira similar ao item (c), pode-se recorrer ao Boletim Focus do Banco Central, que apresenta médias de expectativas para a taxa de câmbio.

¹⁴ A título ilustrativo, a representação gráfica da distribuição de frequência do CSC para o ano 2020 está disponível no Apêndice 3.9.2.

Ao seguir o racional descrito e adotar os valores apresentado na Tabela 1, obtém-se um custo de R\$ 0,60 / litro de gasolina A no ano de 2016.¹⁵

Tabela 1: Principais parâmetros para estimativa do CSC contido na gasolina A

Indicador	Unidade	Valor
Emissões da gasolina (a)	g CO ₂ eq MJ	93
Poder Calorífico Inferior da gasolina (b)	MJ/l	32
Custo do Carbono (c)	US\$/t CO ₂ eq	63
Câmbio (d)	R\$/US\$	3,20

Fontes: (a) US-EPA (2010); (b) EPE (2015); (c) desse estudo, baseado em US-EPA (2016), média dos indicadores; (d) Banco Central do Brasil (2016) (taxa esperada fim de período 2016).

O valor encontrado (em R\$/l gasolina A) é o mesmo valor pleiteado por setores da sociedade civil, indústria e academia para implementação da NDC (Coalizão, 2016), havendo assim um motivo adicional para se adotar tal valor nas análises realizadas no presente estudo.

3.5 Método

3.5.1 Modelo BLUM

O Modelo de Uso da Terra para a Agricultura Brasileira (Brazilian Land Use Model – BLUM), desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Agroicone e do CARD-FAPRI, é um modelo econômico dinâmico, de equilíbrio parcial, multirregional e multimercados para o setor agropecuário brasileiro, que é composto por dois módulos: oferta e demanda de commodities agrícolas, e uso da terra. O modelo pode ser usado em versão integrada ao sistema de modelagem do FAPRI, ou separadamente, em versão apenas para o Brasil.

¹⁵ A título ilustrativo, o Apêndice 3.9.3 apresenta uma série temporal valores do CSC convertidos em R\$/l até 2030.

Quando utilizado em versão integrada, o modelo foi fundamental na regulamentação do etanol de cana-de-açúcar no âmbito do Renewable Fuel Standard 2 (EPA, 2010). Sua versão *stand-alone* tem sido aprimorada por meio de diversas parcerias e é amplamente utilizada por bancos de desenvolvimento, governos, fundações de pesquisa e outras parcerias acadêmicas em estudos prospectivos da agricultura brasileira, tendo particular impacto nas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças do clima (De Gouvello, 2010; Nassar et al., 2011; Assad et al., 2013). O modelo foi recentemente utilizado como ferramenta quantitativa para fundamentar a proposta da iNDC levada pelo governo brasileiro para a COP21 (MMA, 2016; La Rovère et al., 2016).

Para cada setor, o módulo de oferta e demanda é composto de equações (de oferta e demanda) cuja interação dinâmica define simultaneamente preços e quantidades de equilíbrio. A demanda nacional total é formada por consumo interno, exportações e estoques finais, cujos principais determinantes são preços, renda, população etc. A oferta é definida nacionalmente pela soma da produção de cada uma das seis regiões BLUM, adicionados os estoques iniciais (iguais aos estoques finais do ano anterior) e importações. De modo geral, a produção é o resultado da simples multiplicação da área colhida pela produtividade. No caso de produtos agropecuários beneficiados, as eficiências e custos de produção da parte industrial também são considerados.

Construído com elasticidades competição e expansão, o módulo de uso da terra permite simular competição entre lavouras agrícolas, pastagens e vegetação nativa em seis regiões no Brasil. As elasticidades de competição simulam a competição intrarregional por terra entre as atividades agropecuárias¹⁶. As elasticidades de expansão indicam a necessidade de aumentar a área agrícola total de uma região, gerando desmatamento. As elasticidades foram estimadas sob restrições de simetria, homogeneidade e adicionalidade (Holt, 1999) para o período 2002-2009, e usando dados georreferenciados para definir o montante de área passível de exploração agrícola (restrições legais e edafoclimáticas) (Nassar, 2011).

Para este estudo utilizou-se uma versão atualizada do modelo utilizado no projeto IES-Brasil, cuja descrição metodológica está disponível em Moreira et al. (2016). As principais alterações em relação ao modelo anterior dizem respeito às tecnologias do

¹⁶ O modelo simula em cada região sete principais lavouras (dez modelos de produção), pecuária (dois sistemas de produção e três níveis tecnológicos) e florestas plantadas.

setor sucroenergético e o desacoplamento da demanda de etanol do modelo de transportes (o modelo BLUM redefine endogenamente as quantidades de etanol e biodiesel consumidas a determinados preços).

3.5.2 Emissões

O presente estudo adotou uma abordagem consequencial para o cálculo de emissões de GEE. Portanto, as emissões “marginais” de cada cenário são calculadas pela diferença entre os resultados do mesmo e as do cenário de referência (aqui chamado Cenário “Bagaço”). O escopo do estudo contempla as emissões do setor sucroenergético, emissões evitadas da gasolina e o deslocamento da geração convencional de eletricidade. As emissões de produção do setor sucroenergético incluem as emissões “on site” das atividades agrícolas e industriais, além de emissões diretas e indiretas de uso da terra. As emissões de GEE acumuladas no período projetado (2015-2030) são a unidade de medida.

Foram adotados os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 1 para fatores de emissão da gasolina, por unidade de energia, e poder calorífico inferior da gasolina A (USEPA, 2010; EPE, 2016c), obtendo-se um fator de emissão de 3 kgCO₂eq por litro de gasolina.

No Brasil, as termelétricas desempenham um papel de complementação da geração hidrelétrica, principalmente em períodos de hidrologia desfavorável. A expectativa de novas descobertas de gás natural, e também a expansão hidrelétrica com capacidade de armazenamento cada vez menor, podem levar ao aumento da participação deste energético na geração termoelétrica (EPE, 2016c). Considerou-se assim a eletricidade proveniente de termoelétricas a gás natural (ciclos combinados, com 50,3% de eficiência líquida) como linha de base para emissões de eletricidade, resultando em um fator de mitigação de 400 kgCO₂eq/MWh. Assim, a geração elétrica a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar deslocaria a geração por térmicas a gás natural, e as emissões evitadas seriam 400 kgCO₂eq/MWh. O fator de emissão da térmica a gás natural foi calculado a partir do procedimento metodológico sugerido pelo IPCC (2006)

para a confecção dos inventários nacionais; o fator de emissão do gás natural foi assumido 55,84 kg CO₂eq/TJ de gás natural).

Existe, porém, considerável controvérsia em relação à linha de base, ainda mais em um horizonte de quase 15 anos, como é o caso neste estudo. Foi então realizada uma análise de sensibilidade considerando casos mais extremos, permitindo que o leitor faça interpretações alternativas, de acordo com seu julgamento. Para o limite superior foi considerada a geração ainda com gás natural, mas com turbinas a gás operando em ciclo simples, com 32% de eficiência líquida. Aplicado o procedimento recomendado (IPCC, 2006), o fator de emissão resultante na geração na margem é 628 kgCO₂eq/MWh, que seria o fator de mitigação associado à geração com biomassa residual da cana. Já para o caso inferior foi considerado o fator de mitigação de 153 kgCO₂eq/MWh, que foi estimado também supondo a geração com gás natural em ciclos combinados, mas com sistemas de Captura e Armazenamento de Carbono - CCS. Para tanto foram consideradas redução da eficiência líquida da termoelétrica a gás (de 50,3% para 40,2%) e eficiência 70% na captura de CO₂eq (California Energy Commission, 2014). .

As emissões on site da produção de cana-de-açúcar são calculadas pela simples multiplicação da moagem acumulada no período por coeficientes de emissão (kgCO₂eq/t cana) adequados para cada padrão tecnológico considerado, conforme valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Emissões de GEE (on site) por tipo de tecnologia adotada (kgCO₂eq/t cana)

Padrão tecnológico	Descrição	Emissões
Tradicional	Usinas sem investimento em modernização, com manutenção do padrão de produção.	42,5
Moderna	Usinas com investimento em tecnologia na área agrícola e industrial. Colheita mecanizada e vendas de eletricidade excedente. Recolhimento de palha opcional.	40,0
2G	Usinas com investimento em tecnologia na área agrícola e industrial. Colheita mecanizada, vendas de eletricidade e produção de etanol 2G.	42,3

Fonte: Elaboração própria. Dados originais de Macedo e Seabra (2008) e Seabra e Macedo (2011).

Na definição do perfil tecnológico, considerou-se que há correlação na adoção de tecnologias nas áreas agrícola e industrial. O padrão “Tradicional” representa usinas que não se modernizaram, de modo que seu perfil de emissões se assemelha à média do ano de 2006, conforme descrito em Seabra e Macedo (2008). As usinas “Modernas” são aquelas que passaram a adotar novos padrões de produção nas áreas agrícola e industrial, e seu perfil de emissões melhora como um todo. Assumiu-se que usinas que geram excedentes de bioeletricidade (acima de 70 kWh/t cana) poderiam ser classificadas como modernas. Apesar de também se modernizar, a categoria “2G” tem emissões mais altas que a tecnologia moderna pela necessidade de processos adicionais na área industrial.

O cálculo de emissões diretas e indiretas devido ao uso da terra segue a mesma metodologia considerada para regulamentação do *Renewable Fuel Standard 2* (USEPA, 2010) que, no caso do Brasil, tem fatores de emissão calculados para as seis regiões do modelo BLUM (Harris et al., 2009)¹⁷. As emissões marginais no período 2015-2030 são, portanto, resultado da simples multiplicação da mudança de uso da terra (estimada pelo BLUM) pelos fatores de emissão por hectare, conforme informações disponibilizadas no Anexo 3.9.1.

3.5.3 Cenários

O método de análise utilizado neste trabalho é a simulação e a comparação dos resultados de diferentes cenários prospectivos contemplando as principais variáveis que afetarão o desempenho (i.e., competitividade, produção e emissões de GEE) dos biocombustíveis e da bioeletricidade da cana-de-açúcar no horizonte de 2030. O presente estudo analisou (i) as possibilidades de desenvolvimento tecnológico e inovação (cogeração via bagaço, cogeração via bagaço e palha, e etanol de segunda geração) e (ii) a incorporação do CSC na gasolina.

¹⁷ Vale ressaltar que tal estudo considera a cana-de-açúcar como uma lavoura perene, dado que seus estoques de carbono são maiores que os das lavouras anuais.

Embora de extrema relevância para os investidores, é muito difícil tratar o ambiente institucional na modelagem e, muitas vezes, os aspectos correlatos são simplificados ou ignorados em análises quantitativas. Neste trabalho foram feitas hipóteses quanto ao mesmo e foi construído um cenário de referência em relação ao qual pequenas alterações podem ser consideradas e seus efeitos marginais identificados. O ambiente institucional de referência considera relativa estabilidade das decisões governamentais, sem mudanças bruscas de prioridades ou direcionamento de políticas macroeconômicas (como o ocorrido nos últimos anos). Assume-se, assim, que os agentes são capazes de formular expectativas de preços futuros (ainda que os mesmos sejam projeções do passado) de modo a otimizar os sistemas de produção, evitando excessiva capacidade ociosa ou sub-investimentos.

Considera-se em todos os cenários que, após registrar sucessivas quedas do PIB em 2015 e 2016, a economia se estabilize em 2017 (crescimento próximo de zero) e retome paulatinamente a trajetória de crescimento até atingir 2,5% ao ano a partir de 2020. A taxa de câmbio (exógena) é compatível com tais projeções, e a demanda internacional por produtos agropecuários brasileiros foi calibrada no modelo para níveis consistentes com as projeções de IMF (2016) e OECD-FAO (2015) (crescimento médio do PIB de 2,5% ao ano). Nessas condições a frota de veículos leves atinge cerca de 60 milhões de unidades em 2030 (crescimento de 56% em relação a 2015), sendo sua grande maioria (92%) veículos flex.

O preço internacional do petróleo projetado pela Agência Internacional de Energia (*Low price scenario*) é compatível com a conjuntura macroeconômica brasileira e internacional, com preços baixos no curto prazo e a volta ao patamar de USD 95 por barril em 2030 (IEA, 2015). Assumiu-se também que as exportações de etanol combustível e etanol para outros usos seriam as mesmas em todos os cenários (5 bilhões de litros, no total), permitindo que a análise foque nas emissões e políticas brasileiras.

Com relação aos preços mais diretamente relacionados ao setor sucroenergético, assume-se a estrutura tributária atual dos combustíveis (com volta do PIS/COFINS cobrado no etanol em janeiro 2017)¹⁸ e menor interferência governamental na administração de preços de combustíveis, levando redução de arbitragem do preço

¹⁸ Conforme previsto em lei 12.995/2014.

interno e internacional da gasolina. Os leilões de energia elétrica por fonte, ou mesmo regionais, passariam a ocorrer de maneira frequente e com previsibilidade de preços, sendo considerado R\$ 210/MWh¹⁹ um preço remunerador para adoção de sistemas eficientes de cogeração.

Do ponto de vista tecnológico três cenários são explorados, considerando que apenas uma das três vertentes tecnológicas seria dominante na configuração de novos projetos, sendo esses nomeados de “Bagaço”, “2G” e “Max_elec”. Em todos os cenários a taxa de adoção tecnológica é definida por uma fração dos investimentos totais na área industrial. Os investimentos totais em cada ano equivalem à expansão da moagem somada à capacidade de moagem que é substituída, pelo fato dos principais equipamentos terem sua vida útil finalizada (por ano, 1/25 da capacidade de moagem total; 25 anos é a vida útil assumida).

O cenário “Bagaço”, que serve de referência para os demais, pressupõe o emprego de tecnologia moderna, disponível comercialmente e amplamente utilizada, que é o aproveitamento do bagaço para a geração de eletricidade em usinas mistas, ou seja, com produção de etanol e açúcar, e maximização dos excedentes de bioeletricidade. As únicas restrições que limitam a expansão dessa tecnologia são as longas distâncias das usinas aos pontos de conexão às redes elétricas com tensão adequada (o que limita a adoção da tecnologia na Região Amazônica, por exemplo) e rendimentos de escala decrescentes na área industrial (que inibem a adoção da cogeração em larga escala em usinas menores do Nordeste, por exemplo).

No cenário “Max_elec” é considerada a resolução de gargalos tecnológicos que no presente limitam o recolhimento e o uso da palha como combustível, o que, junto com preços remuneradores da eletricidade excedente, levam os empresários a adotarem sistemas de cogeração mais eficientes. Adicionalmente às restrições da convencional cogeração com bagaço (distância da rede elétrica e escala mínima), somente em áreas de colheita mecanizável a palha será recolhida. No cenário “2G” é considerado que esta tecnologia estará disponível em níveis satisfatórios a partir de 2023. Assim como no cenário “Max_elec”, as restrições impostas são as devido à escala, não proximidade da rede elétrica e não disponibilidade de palha de cana-de-açúcar.

¹⁹ Preço médio para as térmicas a biomassa (R\$ 210/MWh) no leilão de Energia de Fontes Alternativas em 2015 (EPE, 2015b).

Os valores tecno-econômicos de referência utilizados foram obtidos junto ao Programa de Avaliação Tecnológica (PAT) do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Etanol, por meio de simulações do Modelo de Biorrefinaria Virtual (BVC) (Bonomi et al., 2012; Bonomi et al., 2016). Os parâmetros são consistentes com tecnologias modernas que estarão disponíveis no curto e médio prazo. Os principais índices de performance técnico-econômicas considerado usinas de com capacidade de processar 2 milhões de toneladas por ano são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Principais indicadores tecno-econômicos para diferentes configurações de usinas consideradas neste estudo

Tecnologia	1G	1G+2G	Max_elec
Investimento (R\$/t cana)	252	367	285
Produção adicional etanol (2G)	-	23	-
Excedente de bioeletricidade (kWh/t cana)	76	66	162
% recolhimento de palha	0	50%	50%
Custo da palha (R\$/t)	0	63,4	63,4
1º ano disponibilidade comercial	2016	2018	2023

Fonte: Elaborado para este estudo, com base na modelagem BVC, Dias et al. (2013) e EPE (2016a).

A velocidade de adoção de cada tecnologia depende do respectivo grau de maturidade e da facilidade de adoção regional. Considerou-se que a tecnologia de cogeração com bagaço para a produção de excedentes é adotada em 90% dos novos investimentos a partir de 2017 em todas as regiões, com exceção à região Norte, onde o acesso à rede elétrica pode ser muito custoso. A tecnologia “Max_elec” passa a ser adotada por 40% dos novos investimentos a partir de 2018 e 80% a partir de 2020, com exceção da região Norte (também por dificuldade de acesso à rede) e Nordeste (a adoção fica limitada à área mecanizável, i.e., atualmente cerca de 10% do total regional). Já a tecnologia “2G” somente se torna comercial em 2023, sendo adotada em cerca de 80% dos investimentos nas mesmas regiões que no cenário “Max_elec”.

A adoção de precificação de carbono sobre a gasolina é a segunda dimensão de análise. Ela se contrapõe ao status quo do ambiente institucional de referência e é assumido que o CSC passa a ser incluído no sistema de precificação da gasolina A. Por

simplicidade assumiu-se que o CSC (R\$ 0,60 por litro de gasolina A, vide 3.4.2) seria gradualmente inserido na precificação da gasolina, via elevações anuais graduais da Contribuições de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE), que passaria dos atuais R\$ 0,10 por litro em 2016 para o valor integral do CSC em 2030.

A combinação de dois ambientes institucionais e três tecnologias resulta num conjunto de seis cenários. Os cenários são apresentados de forma esquemática na Figura 4. Os cenários em que se considera a adoção do CSC fazem parte do Ambiente Alternativo, e fazem contraposição ao Ambiente de Referência (em consideração do CSC).

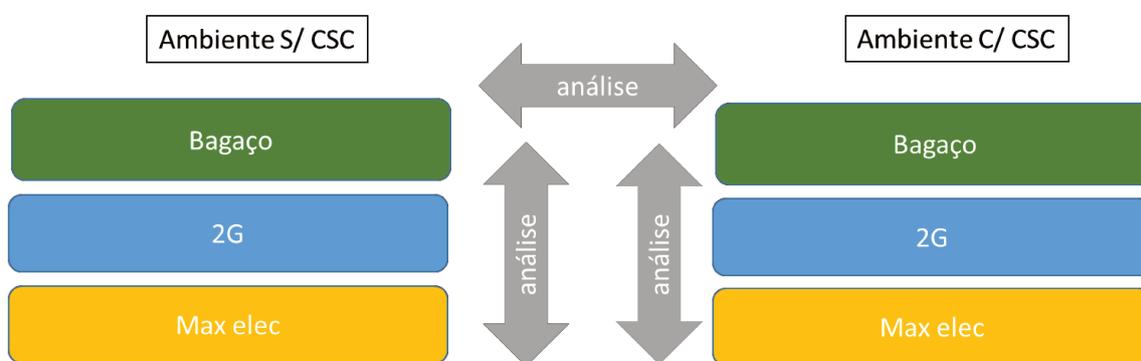


Figura 4: Cenários considerados neste estudo.

Fonte: deste estudo.

Além da comparação com os valores publicados pela EPE como resultados almejados pela NDC, os cenários são comparados entre eles, permitindo avaliações marginais. Enquanto a primeira comparação ajuda a avaliar a dificuldade de se atingir a NDC, a comparação entre cenários permite a observação de tendências e *trade-offs*, de cada medida.

3.6 Resultados

Dado o elevado número de cenários, para a análise decidiu-se selecionar apenas as variáveis de saída do modelo mais relevantes. São reportados (i) os volumes de etanol

total, etanol 2G e bioeletricidade vendida pelo setor (que podem ser comparados com valores mencionados pela EPE em associação ao cumprimento da NDC de energia); e (ii) as emissões de GEE pela produção de biocombustíveis e mudança de uso da terra, assim como as emissões evitadas pelo deslocamento de gasolina e da eletricidade gerada por gás natural.

3.6.1 Níveis de atividade

A nota técnica da EPE (2016a) sobre as bases da iNDC é a principal referência para comparação dos resultados deste estudo com os objetivos da NDC. De acordo com a nota, a produção total de etanol deve alcançar 54 bilhões de litros em 2030, sendo 2,5 bilhões de segunda geração, e 76 TWh de bioeletricidade excedente (considerando biomassa de cana-de-açúcar e outras biomassas). Aqui, por simplificação, e por ter o maior potencial de geração elétrica em larga escala, é considerado que a meta deve ser em grande parte cumprida com uso de biomassa residual da cana-de-açúcar. Os seis cenários apresentados na Figura 4 foram simulados individualmente no BLUM e seus resultados são apresentados na Tabela 4.

O cenário “Bagaço”, no ambiente de referência e geração de eletricidade sem rupturas tecnológicas, resulta em menos de 41 bilhões de litros de etanol produzidos e 50 TWh de eletricidade excedente, e serve de referência para estimativas de emissões adicionais em função das políticas e tecnologias estudadas neste artigo. Nele, a produção de etanol e bioeletricidade ficam muito abaixo do necessário para cumprimento da submeta NDC (13,5 bilhões de litros e quase 25 TWh/ano), indicando a necessidade de medidas adicionais de estímulo (além de um ambiente institucional mais estável).

Tabela 4: Níveis de atividade em 2030 das variáveis selecionadas para análise.

Referência/Cenário	Etanol total (bi litros/ano)	2G (bi litros/ano)	Bioeletricidade (TWh/ano)
EPE- NDC	54,00	2,50	76,00
Ambiente de referência			
Bagaço	40,55	-	49,85
Max_Elec	44,64	-	91,56
2G	45,05	5,66	47,53
Ambiente alternativo			
Bagaço_CSC	53,37	-	60,90
Max_Elec+CSC	59,99	-	117,64
2G+CSC	60,81	7,85	58,84

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2016a) e resultados do estudo,

Ainda considerando o ambiente de referência, os dois outros cenários pressupõe que novas tecnologias se tornam comerciais. A hipótese é que o aproveitamento de 50% da palha para geração de eletricidade se torna comercialmente disponível antes do etanol de segunda geração. No cenário “Max_Elec”, as vendas de bioeletricidade para a rede tem um salto de mais de 80%, ultrapassando com facilidade os 76 TWh tidos como meta para eletricidade da biomassa. O aumento de rentabilidade – dadas as receitas adicionais da geração com palha – acrescentam receita e diluem custos fixos do etanol de primeira geração, fazendo com o que a produção total de etanol tenha um acréscimo de pouco mais de 4 bilhões de litros por ano.

No caso do cenário “2G”, por hipótese, ao se tornar tecnologia comercialmente disponível em 2023, o etanol de segunda geração passa a ser a opção adotada em 80% dos novos investimentos, acrescentando 5,7 bilhões de litro de etanol 2G no mercado. O resultado indica, possivelmente, uma visão otimista quanto à tecnologia, já que o resultado quanto à produção de etanol 2G é mais do que o dobro da apresentada no estudo de referência (EPE, 2016a). Porém, a produção total de etanol aumenta apenas 4,5 bilhões de litros. Observa-se assim uma substituição de 1,16 bilhão de litros de etanol 1G dada a expansão de etanol 2G. Tal fenômeno também é conhecido como

efeito “*crowding-out*” em certas áreas da teoria econômica. Tal redução é equivalente a 20% (1,16 dividido por 5,66) da expansão do etanol 2G. Sem políticas voltadas para seu consumo, o etanol 2G passa a competir diretamente com o etanol de primeira geração, além da gasolina.

Embora as inovações tecnológicas contribuam para um aumento de quase 10% na produção de etanol, no conjunto os resultados dos três cenários até aqui analisados ficam abaixo dos níveis de produção indicados no estudo de referência (EPE, 2016a). Fica claro, assim, que políticas com foco exclusivo em PD&I não serão suficientes para o cumprimento das NDCs de biocombustíveis.

Na sequência da análise, considera-se que o CSC passa a ser gradualmente somado ao preço da gasolina A até chegar a R\$ 0,60 em 2030. Os resultados são muito diferentes dos cenários expostos anteriormente, que consideram a atual estrutura de formação de preços de combustíveis. Em todos os cenários em que se considera CSC, os resultados chegam muito próximos, ou até ultrapassam, os valores de produção de etanol esperados na NDC. Cabe destaque ao cenário “Max_elec+CSC”, que é o único em que se atende (e até ultrapassa) simultaneamente os volumes esperados para produção total de etanol e a meta de geração de bioeletricidade. Dada a ausência de um modelo de energia elétrica, não foi possível simular um possível efeito *crowding-out* da energia elétrica renovável (muito embora tenham sido realizadas análises de sensibilidade para diferentes fatores de emissão da energia deslocada pela bioeletricidade).

No caso do cenário “2G+CSC”, a produção de etanol 2G é muito superior ao resultado de referência (2,5 bilhões de litros). No entanto, neste cenário, pelo comprometimento do bagaço e da palha com a produção de etanol 2G, a geração elétrica excedente fica aquém dos resultados esperados quanto à geração de bioeletricidade.²⁰ Como é bastante improvável que outras biomassas possam viabilizar a geração diferencial de 18 TWh, é de se supor que neste caso os valores esperados pelo governo Brasileiro não serão atingidos. Neste cenário, o mesmo fenômeno de *crowding-out* é observado. Porém, o *crowding-out* é menor no cenário com CSC (5%) que no caso anterior (20%), e isso ocorre justamente pela maior competitividade do etanol frente à gasolina.

²⁰ Resultado similar foi encontrado em Gurgel e Maluf (2014).

3.6.2 Emissões de GEE

Apesar de gerar outros benefícios, a redução de emissões de GEE é o principal objetivo das NDCs. Nesta seção busca-se uma interpretação adicional aos resultados anteriores, reduzindo os diferentes indicadores a uma única unidade de medida: emissão e mitigação de GEEs. Para tanto, foram estimadas as emissões de produção e beneficiamento industrial dos produtos da cana-de-açúcar, emissões devido à mudança de uso da terra (LUC e iLUC), emissões evitadas pela redução de consumo de gasolina, e emissões evitadas pela substituição de eletricidade na margem do Sistema Integrado Nacional (SIN). Para isso foi adotada uma abordagem consequencial, em comparação ao cenário referência para o período 2015-2030.

Os valores apresentados nas barras da Figura 5 representam a diferença de emissões acumuladas no período 2015-2030. As extensões das barras empilhadas indicam a variação absoluta de emissões dentro daquela categoria, enquanto a marcação do triângulo dentro das barras indica o saldo líquido de GEEs. Os limites das retas tracejadas equivalem ao limite da análise de sensibilidade em relação ao saldo líquido de emissões (triângulo). Valores positivos indicam que as emissões são maiores, enquanto valores negativos indicam emissões menores.

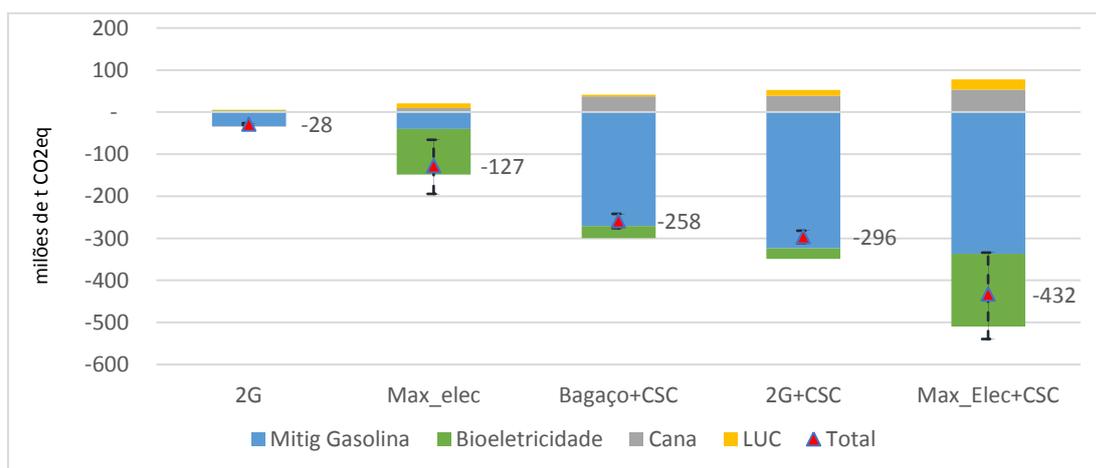


Figura 5: Emissões acumuladas em comparação ao cenário de referência (milhões de toneladas de CO₂eq)

Fonte: resultados deste estudo.

O resultado do cenário “2G” é uma produtividade por hectare significativamente maior, e uma área menor de cana-de-açúcar. Os benefícios são o aumento da produção e do consumo de etanol (substituindo gasolina), além de reduzir as emissões de mudança de uso da terra, tanto diretas quanto indiretas, resultando num saldo líquido de 28 milhões de toneladas entre 2015 e 2030. Apesar de gerar um pouco menos excedentes de bioeletricidade que o cenário “Bagaço”, a diferença acumulada entre cenários é desprezível e não pode ser claramente identificada na Figura 5.

No cenário “Max_elec”, por motivos de rentabilidade econômica discutidos anteriormente, os benefícios marginais da redução do consumo de gasolina são maiores que no cenário “Bagaço” e pouco menores que os dos “2G”. A maior substituição da gasolina por etanol gera expansão da moagem de cana-de-açúcar e expansão da área agrícola, o que eleva as emissões nessas duas classes em relação ao cenário “Bagaço”. A grande vantagem, porém, resulta da maior geração de bioeletricidade. Ainda que haja mais emissões devido a maior necessidade de insumos para produção, o deslocamento de gasolina e da eletricidade convencional mais que compensam, tornando o cenário “Max_Elec” o mais interessante dentre os cenários sem incorporação dos CSC.

A incorporação do CSC no custo da gasolina implica significativa ampliação dos resultados. A mitigação adicional das emissões da gasolina aumenta em pelo menos 230 milhões de toneladas de CO₂eq entre o cenário “2G” e o cenário “Bagaço+CSC”. Pode-se observar na Figura 5 que nas três variantes em que se considera CSC, as emissões relativas à produção de cana-de-açúcar e à mudança do uso da terra crescem, mas essas são mais do que compensadas pelo deslocamento da gasolina e da eletricidade convencional.

A introdução da tecnologia 2G tem dois efeitos positivos. Por um lado, aumenta a quantidade de etanol disponível no mercado (e, indiretamente, de bioeletricidade), reduzindo o consumo de gasolina. Por outro, ela reduz a necessidade de matéria prima para uma mesma quantidade de etanol, reduzindo as emissões em comparação com o cenário “Bagaço+CSC”. O saldo líquido de mitigação de emissões desse cenário é de 296 milhões de toneladas de CO₂eq adicionais ao cenário Referência, ou mitigação adicional 15% maior que a do cenário “Bagaço+CSC”.

O cenário “Max_Elec+CSC” não tem o mesmo apelo de redução de emissões quanto ao uso da terra e no processamento da cana-de-açúcar. O deslocamento de gasolina no sistema de transportes é muito próximo ao obtido no cenário de “2G+CSC”²¹. A maior diferença entre o cenário “2G+CSC” e o “Max_Elec+CSC” se dá pelo deslocamento de eletricidade, que expande o resultado líquido de mitigação adicional em 137 milhões de toneladas de CO₂eq. Assim como nos cenários sem CSC, o benefício ambiental é mais alto no cenário com recolhimento de palha para cogeração de bioeletricidade.

A análise de sensibilidade quanto ao fator de emissão da eletricidade deslocada mostra resultados significativos nos cenários em que se maximizam os excedentes de bioeletricidade, enquanto os demais são pouco afetados. A mitigação adicional varia entre 60 e 189 milhões de toneladas de CO₂eq no cenário “Max_Elec”. Já a mitigação adicional do cenário “Max_Elec+CSC” varia de 325 a 530 milhões de toneladas de CO₂eq. Nos casos onde o valor de base para eletricidade é baixo, a mitigação adicional se aproxima dos valores obtidos com tecnologia 2G, porém ainda são marginalmente mais interessantes em termos de redução de emissões. Dessa maneira pode-se avaliar que, dadas as condições consideradas nesse estudo, a maximização de cogeração com suprimento adicional de palha tende a ser mais eficaz para redução de emissões de GEE que a tecnologia 2G.

3.7 Conclusões e recomendações

No presente estudo foram avaliadas diferentes estratégias para cumprimento das metas NDC relativas à potencial contribuição da cana-de-açúcar, e foram consideradas opções tecnológicas (etanol 2G, cogeração via bagaço, e maximização de geração elétrica com recolhimento de palha) e introdução do CSC na estrutura de preços da gasolina. Os níveis de produção de etanol (total e 2G) e vendas de excedentes de

²¹ Uma análise minuciosa dos resultados demonstra que, embora o volume total de etanol em 2030 seja maior no cenário “2G_CSC”, a redução de emissões por deslocamento da gasolina A é 4% maior no cenário “Max_Elec+CSC”. Por se esperar que o recolhimento de palha para cogeração estará disponível comercialmente antes da tecnologia 2G, o deslocamento de gasolina no cenário “Max_Elec+CSC” é maior nos primeiros anos da simulação.

bioeletricidade foram comparadas com valores que fundamentaram as metas brasileiras. Em seguida realizou-se uma comparação do saldo líquido de emissões/mitigação adicional ao cenário referência de GEE. Foram consideradas as emissões de produção do setor sucroenergético (incluindo impactos diretos e indiretos da mudança do uso da terra), emissões da gasolina, e deslocamento de emissões na margem do SIN.

Os resultados dos três cenários sem inclusão do CSC mostram que nenhum deles atinge as metas. Isso nos permite concluir que o foco exclusivo no desenvolvimento tecnológico muito provavelmente não será suficiente para cumprir com os objetivos originais submetidos à COP21. Interferir no diferencial de preços da gasolina e etanol, via CSC emitido pela gasolina gera resultados muito superiores às inovações tecnológicas (produção de etanol pelo menos 10 bilhões de litros maior em 2030). Estudos adicionais que aprofundem o conhecimento sobre custos e precificação do carbono no Brasil são uma recomendação desse estudo.

A contribuição da tecnologia de etanol 2G é considerável para aumentar a disponibilidade de etanol no mercado, fazendo com que a produção (e consumo total) aumente em 7 bilhões de litros nos cenários com inclusão do CSC. Observa-se, porém, um efeito *crowding-out* no qual o etanol de segunda geração compete com o etanol de primeira geração. Esse resultado difere, portanto, dos resultados tradicionalmente encontrados nos estudos de ciclo de vida que consideram que a o etanol 2G sempre substitui gasolina. O efeito *crowding-out* do etanol 2G é menor na presença de políticas de precificação do carbono.

A meta relativa à bioeletricidade somente é atingida no cenário em que se considera o recolhimento de palha para geração de bioeletricidade, nesse caso com folga considerável em relação à meta. Nesse mesmo cenário a meta de produção de etanol total também é atingida. Fica evidente a existência de efeitos sinérgicos entre bioeletricidade e produção de etanol, via rentabilidade. A importância do uso da palha como combustível na geração de eletricidade deve ser destacada também pelo fato de que ainda há problemas a serem superados para que seu uso ocorra em larga escala, com custos baixos e com eficiência. Portanto, ações de PD&I são necessárias, inclusive para que as metas de redução de emissões de GEE possam ser alcançadas com menores dificuldades.

A análise de ciclo de vida consequential (com foco único na pegada de carbono) traz conclusões muito importantes para a formulação das políticas voltadas para a expansão da bioenergia com base em cana-de-açúcar. Primeiramente, é possível concluir que as emissões de produção de biomassa são pequenas comparativamente aos benefícios, mesmo contabilizando as emissões diretas e indiretas de mudança do uso da terra. A correta precificação das externalidades impulsiona o setor renovável e é a principal variável para definir volumes ainda mais significativos de redução de emissões de GEE. A combinação dessa precificação com desenvolvimento tecnológico tem potencial de ampliar ainda mais o benefício da expansão do setor, particularmente no que diz respeito ao melhor aproveitamento da palha de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração.

A contribuição ambiental do cenário “2G+CSC” (medido como emissões de GEEs) é importante (mitigação cerca de 15% acima do resultado do cenário “Bagaço+CSC”) porém menos expressiva que o esperado. Primeiramente, esse resultado está relacionado a estudos mais atuais quanto ao efeito indireto da mudança do uso do solo (iLUC), que no caso da cana-de-açúcar tem se comprovado pequeno (CARB, 2015; Valin et al., 2015). Sendo assim, a principal contribuição da tecnologia 2G estaria na redução de uso de insumos consumidos na produção e no processamento da cana-de-açúcar e na capacidade de expandir a oferta de etanol e deslocar gasolina. A modelagem desenvolvida neste estudo demonstrou que, na ausência de políticas específicas para o etanol 2G, o mercado interno tende a fazer com que o mesmo compita com o etanol 1G e não apenas com a gasolina, cumprindo assim apenas parcialmente suas funções originais.

Deve-se ponderar hipóteses simplificadoras assumidas pelo estudo. Primeiramente o cenário referência considera relativa estabilidade macroeconômica e da política energética nacional, permitindo um melhor planejamento dos investimentos pelo setor privado. O preço da bioeletricidade (assumido em R\$ 210/MWh) é uma pressuposição que pode não ocorrer. Não foram também consideradas mudanças nos regimes climáticos que poderiam tornar a produtividade agrícola mais imprevisível. A eliminação de imperfeições de mercado é comum aos modelos econômicos de longo prazo e pode estar levando a resultados possivelmente mais otimistas.

Neste trabalho a entrada das novas tecnologias ocorre próxima de seu potencial máximo, sendo aplicada em 80% dos casos de investimento novos a partir do momento em que passa a estar disponível comercialmente. Embora essa seja uma das razões do nome “rupturas” tecnológicas, pode-se considerar que essa substituição ocorrerá de maneira mais lenta, ao se considerar os detalhes de cada investimento. Nesse caso é razoável considerar que a intensidade dos resultados seja menor.

Em contrapartida, como visto na revisão de literatura, os valores utilizados neste trabalho para simulação do potencial do etanol 2G são relativamente menos otimistas que boa parte das publicações listadas na revisão de literatura. A redução de custos de produção (enzimas, redução do custo de capital e a maiores eficiências) podem levar a menores impactos dos efeitos *crowding-out*. Novamente, entende-se nesse caso que há uma redução de intensidade, e não de viés.

Por fim, a introdução do CSC no sistema de precificação foi feita de maneira simples via aumento de incidência de tributação sobre a gasolina A. Tal hipótese não deveria ser entendida como uma recomendação do estudo. Existe uma gama muito maior de possibilidades para tal inclusão, desde redução de tributação sobre renováveis, mercados nos quais o carbono é transacionado (onde recursos nacionais e internacionais poderiam ter grandes impactos), entre outros. Recomenda-se nesse caso uma exploração mais profunda dos efeitos de diferentes mecanismos no setor bioenergia e nos demais setores, simultaneamente.

3.8 Referências do Capítulo 3

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Anfavea apresenta estudo sobre o mercado brasileiro de autoveículos em 2034.** 2014. Disponível em www.anfavea.com.br/docs/06%2011%2014_PressRelease_Estudo_2034.pdf. Acesso em 2016.

BRESSAN FILHO, A.. **Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil.** Superintendência de Informações do Agronegócio, CONAB, 87. 2010.

NASSAR A. M.. **Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agro-industrial and Environmental Impacts.** Relatório Científico Final. 2011.

BANCO CENTRAL DO BRASIL,- BCB. **Relatório Focus Novembro de 2016.** Disponível em <http://www.bcb.gov.br/?FOCUSRELMERC>. Acesso em novembro 2016.

BANCO MUNDIAL. **Carbon Pricing: Building on the Momentum of the Paris Agreement.** 2016. Disponível em www.worldbank.org/en/news/feature/2016/04/15/carbon-pricing-building-on-the-momentum-of-the-paris-agreement.print. Acesso agosto 2016.

BONOMI, A.; CAVALETT, O.; PEREIRA DA CUNHA, M., LIMA, M.A.P. (EDS.). **Virtual Biorefinery: An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization.** p. 285. Springer International Publishing. 2016.

BONOMI, A., MARIANO, A. P., JESUS, C. D. F., FRANCO, H. C. J., CUNHA, M. P., DIAS, M. O. S., E JUNQUEIRA, T. L. . **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB): 2011 Report.** Campinas, São Paulo: Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), Technological Assessment Program (PAT). Internal Report, 2012. Available at: [http:// goo. gl/ x1Ach](http://goo.gl/x1Ach). Accessed 07.16.

BRASIL. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC).** 2015b Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf

Gurgel, Angelo Costa, Maluf, Gabriel. **Competição entre o etanol de segunda geração e a bioeletricidade pelo uso do bagaço de cana de açúcar.** SOBER 52º Congresso. 2014

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE- MMA. **Fundamentos para iNDC brasileira.** 2016. Disponível em www.mma.gov.br/quem-%C3%A9-quem/item/10710-fundamentos-para-a-elabora%C3%A7%C3%A3o-da-pretendida-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada-indc-do-brasil-no-contexto-do-acordo-de-paris.

STATE OF CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB - **Staff report: initial statement of reasons for proposed rulemaking.** Proposed re-adoption of the low carbon fuel standard regulation. 2015. Disponível em www.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15isor.pdf

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Assessment of natural gas combined cycle plants for carbon dioxide capture and storage in a gas-dominated electricity market.** 2014.

CARDOSO, TEREZINHA DE FÁTIMA; OTÁVIO CAVALETT; MATEUS FERREIRA CHAGAS; EDVALDO RODRIGO DE MORAIS; JOÃO LUÍS NUNES CARVALHO; HENRIQUE COUTINHO JUNQUEIRA FRANCO; MARCELO VALADARES GALDOS; FÁBIO VALE SCARPARE; OSCAR ANTONIO BRAUNBECK; LUIS AUGUSTO BARBOSA CORTEZ; ANTONIO BONOMI. **Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system.** Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 353-360, outubro. 2013

COALIZÃO BRASIL. **Pós-acordo de Paris. Caminhos para implementação da economia de baixo carbono.** 2016. Disponível em: coalizaobr.com.br/2016/index.php/docs/documentos-da-coalizacao?download=71:pos-acordo-de-paris-caminhos-para-implementacao-da-economia-de-baixo-carbono

DIAS, M. O., JUNQUEIRA, T. L., CAVALETT, O., CUNHA, M. P., JESUS, C. D., MANTELATTO, P. E., E BONOMI, A.. **Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane.** Chemical engineering research and design, 91(8), 1411-1417. 2013

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, M. M. E.. **Plano decenal de expansão de energia 2024.** Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2015a

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia.** 2016a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto.** EPE-DPG-SGB-Bios-NT-02-2016. Rio de Janeiro. 2016b

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, MME **Balço Energético Nacional 2016.** 2016c Disponível em <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em agosto 2016.

IEA-RETD. **Towards advanced biofuels – options for integrating 1st and 2nd generation biofuel production.** 2016. Disponível em <http://iea-retd.org/wp-content/uploads/2016/08/20160202-IEA-RETD-RES-T-BIOPLANT-1.pdf>. Acesso em Dezembro 2016.

GOUVELLO, CHRISTOPHE DE. **Brazil low-carbon country case study**. 2010. Available at <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US2014602315>. Access in August 2016.

GRANVILLE, S., LINO, P., RALSTON, F., BARROSO, L. A., E PEREIRA, M.. **Recent advances of sugarcane biomass cogeneration in Brazil**. In 2009 IEEE Power e Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE. 2009

HARRIS, N. L.; GRIMLAND, S.; BROWN, S. **Land Use Change and Emission Factors: Updates since Proposed RFS Rule**. Report submitted to EPA. 2009.

HOLT, MATTHEW T. **A linear approximate acreage allocation model**. Journal of Agricultural and Resource Economics, p. 383-397, 1999.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Outlook 2015**. 2015.

INTERNATIONAL MONETARY FUND – IMF. **World Economic Outlook Database WEO, Update**, 2016. Available at. www.imf.org. Acesso em fevereiro 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 2: Stationary Combustion**. 2006.

LEAL, M. R. L., GALDOS, M. V., SCARPARE, F. V., SEABRA, J. E., WALTER, A., E OLIVEIRA, C. O.. **Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review**. Biomass and Bioenergy, 53, 11-19. 2013.

INTERAGENCY WORKING GROUP ON SOCIAL COST OF CARBON, UNITED STATES GOVERNMENT - IAWG, U. S. **Technical support document: Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866**. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, Washington, DC, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2014: Mitigation of 372 Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of 373 the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. 374 Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. 375 Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow. 2014.

LA ROVÉRE, E. L.; WILLS, W.; PEREIRA JR, A. O.; DUBEUX, C. B. S; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, B. C. P.; MOREIRA, M.M.R.; WATANABE, S; LOUREIRO, S. M.; GROTTERA, C.; HARFUCH, L.; WEISS, M.; SANTOS, L. A. S.; CARVALHO, P.T.; KISHINAMI, R.; ZVEIBIL, V.; SANTOS, L.; ELY, R. N.; MOREIRA, L. S. S.C.; KIMURA, W.; SANTOS, T.; TONI, A.; LEFREVE, J.; BACHION, L. C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; WALTER, M. K. C; ZICARELLI, I.; E OLIVEIRA, L. D. B.; **Implicações Econômicas E Sociais De Cenários De Mitigação De Gases De Efeito Estufa No Brasil Até 2030: Projeto Ies-Brasil**, Forum Brasileiro De Mudanças Climáticas – Fbmc. Coppe/Ufrj, Rio De Janeiro, 2016.

LINERO, F.. **Aproveitamento da palha da cana de açúcar.** Centro de Tecnologia Canavieira. 16º Seminário Brasileiro Agroindustrial. Ribeirão Preto – Outubro de 2015.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., E SILVA, J. E.. **Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020.** 2008. Biomass and bioenergy, 32(7), 582-595.

MILANEZ, A. Y., NYKO, D., VALENTE, M. S., SOUSA, L. C., BONOMI, A. M. F. L. J., JESUS, C. D. F. D., JUNQUEIRA, T. L.. **De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro. 2015.

MOREIRA, M.M.R.; HARFUCH, L.; KIMURA,W.; BACHION, L.C.; LIMA,R.; ZAMBIANCO,W.; NASSAR, A.; DUBEUX, C.B.S.; E WALTER, M.K.C. (2015). Cenários de AFOLU. In: LA ROVERE, E. L. et al., 2016 – **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil**, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

NOVACANA.COM. **Futuro brilhante do etanol celulósico está ameaçado.** Disponível em www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/futuro-brilhante-etanol-celulosico-ameacado-010316/. Acesso em outubro 2016.

OECD FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2015**, OECD Publishing, Paris. Available at, http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en.) ISBN 978-92-64-23203-7. 2015.

PARRY, IAN DIRK HEINE, ELIZA LIS, AND SHANJUN LI. **Getting Energy Prices Right : From Principle to Practice.** International Monetary Fund. July 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5089/9781484388570.071> ISBN:9781484388570. 198p. 2014

RODRIGUES, L., E BACCHI, M. R. P.. **Light fuel demand and public policies in Brazil**, 2003–2013. Applied Economics, 1-14. 2016.

SANTOS, G. R. D., GARCIA, E. A., E SHIKIDA, P. F. A.. **A Crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas.** 2015.

SATOLO, L. F., E BACCHI, M. R. P. (2009). **Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar.** Economia Aplicada, 13(3), 377-397.

SEABRA, J. E., E MACEDO, I. C.. **Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil.** Energy Policy, 39(1), 421-428. 2011.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Agreement.** Available at: http://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **The Paris Agreement** (webpage). http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php. |Acesso em novembro 2016.

UNICA. **Estimativa Safra 2015/2016**. 2015. Disponível em <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em janeiro 2016.

UNICA. **Bioeletricidade em números**. 2016. Outubro de 2016. Disponível em <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em outubro 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. EPA-420-R-10-006. Fevereiro de 2010. Disponível em <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/420r10006.pdf>. Acesso em agosto 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) **The Social Cost of Carbon. Fact Sheet**. 2015. Disponível em www3.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/social-cost-carbon.pdf. Acesso em agosto 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. EPA-420-R-10-006. Fevereiro de 2010. Disponível em <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/420r10006.pdf>. Acesso em agosto 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **The Social Cost of Carbon** (webpage). www.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon. Acesso em novembro 2016.

VALIN, H., PETERS, D., VAN DEN BERG, M., FRANK, S., HAVLIK, P., FORSELL, N. E SCHMIDT, E.. **The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts**. Ecofys, IIASA e E4tech. European Commission. 2015.

WEITZMAN, MARTIN L. **Fat tails and the social cost of carbon**. The American Economic Review, v. 104, n. 5, p. 544-546, 2014

3.9 Material suplementar

3.9.1 Anexo: Fatores de emissão para mudança de uso da terra

Tabela 5 Fatores de emissão por tipo de mudança de uso da terra (30 anos, tonelada CO₂eq/ha)

Região	Anual para Perene	Pasto para Perene	Pasto para Anual	Natural para Anual	Natural para Perene	Natural para Pasto
Sul	(144)	14	163	214	60	45
Sudeste	(106)	17	130	175	59	39
Centro-Oeste Cerrado	(115)	15	133	196	74	55
Norte Amazônia	(118)	19	143	505	354	331
Nordeste Litorâneo	(97)	18	116	146	44	25
Nordeste Cerrado	(99)	20	124	187	79	58

Nota: valores negativos entre parêntesis.

Fonte: Haris (2009)

3.9.2 Anexo: Distribuição de Probabilidade do Custo Social do Carbono

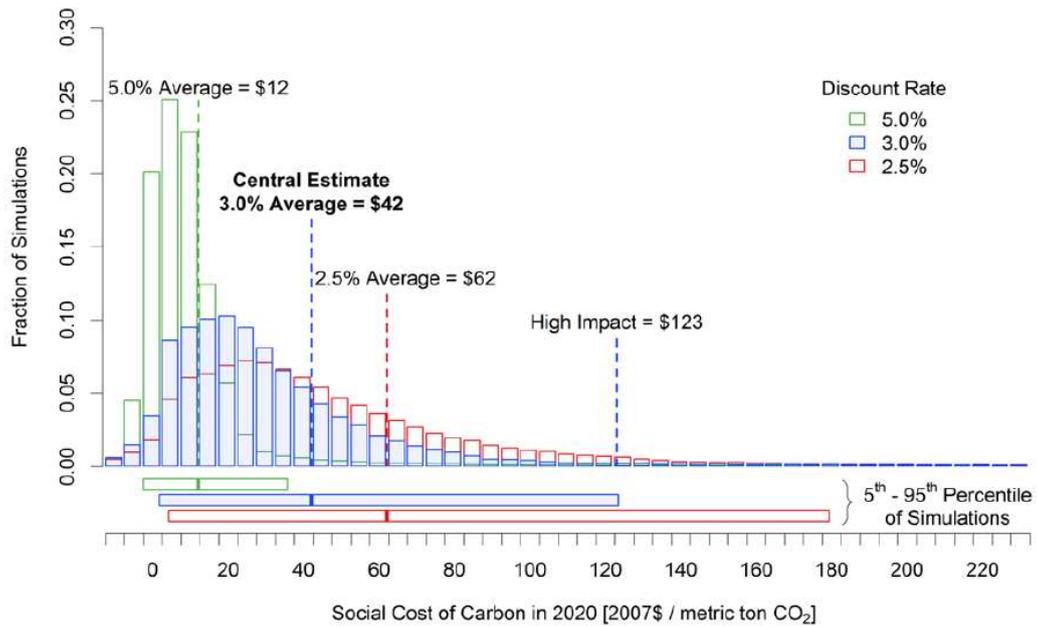


Figura 6: Distribuição de frequência do custo social do carbono em 2020

Fonte: Interagency Working Group. Technical update on the social cost of carbon for regulatory impact analysis-under executive order 12866. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, 2016

3.9.3 Apêndice: Cálculo do Custo Social do Carbono na gasolina A (R\$/l)

Os valores da tabela abaixo foram obtidos a partir da tabela publicada em USEPA (2016). Os valores originais (para o ano 2007) foram corrigidos pela inflação americana (inflação acumulada de 17% entre 2007 e 2016). A transformação de USD/ tonelada de CO₂eq para R\$/ litro de gasolina A foi obtida por meio da aplicação da equação (1), para cada ano.

$$\frac{93,10 \text{ gCO}_2 \text{ eq.}}{\text{MJ}} \times \frac{32,24 \text{ MJ}}{\text{l}} \times \frac{1 \text{ tCO}_2 \text{ eq.}}{1.000 \text{ gCO}_2 \text{ eq.}} \times \frac{\text{média US\$}}{\text{tCO}_2 \text{ eq.}} \times \frac{3,20 \text{ R\$}}{1 \text{ US\$}}$$

Tabela 6: Estimativa do Custo Social do carbono da gasolina A em diversos anos.

Ano	Média com 5%	Média com 3%	Média com 2,5%	Alto impacto (95o percentil, 3%)	Média dos indicadores USEPA	R\$/l Gasolina A
2010	12	36	58	101	51,8	0,50
2011	13	37	60	105	53,8	0,52
2012	13	39	62	109	55,6	0,53
2013	13	40	63	113	57,3	0,55
2014	13	41	64	118	59,1	0,57
2015	13	42	66	123	60,8	0,58
2016	13	44	67	126	62,6	0,60
2017	13	46	69	131	64,6	0,62
2018	14	47	70	136	66,7	0,64
2019	14	48	71	140	68,4	0,66
2020	14	49	73	144	69,9	0,67
2021	14	49	74	147	71,1	0,68
2022	15	50	75	151	72,8	0,70
2023	15	51	76	154	74,3	0,71
2024	15	53	77	158	75,7	0,73
2025	16	54	80	161	77,8	0,75
2026	16	55	81	165	79,3	0,76
2027	18	56	82	167	80,7	0,78
2028	18	57	83	171	82,2	0,79
2029	18	57	84	174	83,4	0,80
2030	19	58	85	178	85,1	0,82
2035	21	64	91	197	93,3	0,90
2040	25	70	98	214	101,8	0,98
2045	27	75	104	230	109,1	1,05
2050	30	81	111	248	117,6	1,13

Fonte: dados do estudo. Dados originais de IWGSCS (2016).

4 CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

A NDC brasileira impõe um enorme desafio para a bioenergia no Brasil, sendo o setor sucroenergético parte essencial dos esforços nacionais para o combate às mudanças do clima. A presente tese teve como objetivo principal identificar estratégias para expansão do setor sucroenergético e mensurar suas efetivas contribuições para a NDC brasileira.

O método baseia-se em uma avaliação sistêmica alicerçada no aprimoramento do modelo BLUM e em simulações de cenários. Os seguintes aprimoramentos foram introduzidos no modelo: incorporação de um painel de tecnologias para o setor sucroenergético; detalhamento da estrutura de formação de preços de combustíveis do ciclo Otto; aprimoramento do módulo de demanda por etanol tendo em conta a expansão dos veículos flex. Tais melhorias permitiram a incorporação de análise de efeitos indiretos da expansão de biocombustíveis sobre uso da terra (como recomendado pelo IPCC), evidenciaram interfaces com o planejamento energético, e permitiram recomendações para políticas climáticas.

Buscando maior eficiência no desenvolvimento da pesquisa, e maior repercussão na divulgação dos resultados, optou-se por uma estrutura de tese que incorpora dois artigos, que serão submetidos a periódicos científicos. O primeiro teve como objetivo analisar as contribuições de sistemas de precificação para bioeletricidade e tecnologias de cogeração altamente eficientes para atender às metas da NDC brasileira em 2030. O segundo artigo complementa o primeiro e, além das tecnologias de cogeração, também considera a introdução da tecnologia de etanol 2G e diferentes sistemas de precificação da gasolina A.

Os resultados do primeiro artigo indicam que, com melhores preços para bioeletricidade, a moderna tecnologia de cogeração é adotada na fase industrial, sempre que possível, gerando resultados positivos para expansão do setor sucroenergético como um todo. Além do deslocamento da eletricidade gerada na margem do SIN, a geração de excedentes de bioeletricidade também ajuda a aumentar a renda setorial, expandindo a produção e o consumo de etanol e, ao mesmo tempo, reduzir seus preços (em função da

diluição de custos de produção). No entanto, mesmo com sistemas de cogeração eficientes, o excedente de eletricidade gerado apenas pelo bagaço de cana-de-açúcar é menor do que o esperado para cumprimento da NDC. Verifica-se, assim, a necessidade da consolidação tecnológica da utilização da palha como combustível adicional para cogeração em usinas de cana-de-açúcar.

Ao retirar o diferencial tributário do etanol sobre a gasolina (assumindo estrutura tributária que passará a vigorar em janeiro de 2017), e mantendo os preços de bioeletricidade acima de R\$ 200/MWh (recomendação do primeiro artigo), os resultados do segundo artigo indicam que nenhum dos três cenários tecnológicos resulta valores próximos das metas previstas na fundamentação da NDC. Isso permite concluir que atuar apenas na estrutura de formação de preço da bioeletricidade não será suficiente para o cumprimento das metas NDCs se o etanol não for competitivo perante a gasolina. Conclui-se ainda que o foco exclusivo no desenvolvimento tecnológico muito provavelmente não será suficiente para cumprir as metas NDC no prazo assumido. Por outro lado, um ajuste nos preços relativos de etanol e gasolina (via incorporação de um imposto ambiental equivalente ao CSC emitido pela gasolina) gera resultados muito superiores em todos os cenários.

Do ponto de vista tecnológico, a tecnologia 2G aumenta consideravelmente a disponibilidade de etanol no mercado. Observa-se, porém, um efeito *crowding-out* no qual o etanol de segunda geração compete com o etanol de primeira geração. Esse resultado difere, portanto, dos resultados tradicionalmente encontrados nos estudos de ciclo de vida que consideram que o etanol 2G sempre substitui gasolina. O efeito *crowding-out* do etanol 2G é menor na presença de políticas de precificação do carbono.

Os níveis esperados para excedente de bioeletricidade e produção de etanol somente são atingidos (simultaneamente) nos cenários em que se considera o recolhimento de palha para geração de bioeletricidade (com considerável margem do resultado em relação à meta). Fica evidente a existência de efeitos sinérgicos entre bioeletricidade e produção de etanol, via rentabilidade, aspecto esse identificado nos dois artigos. Na indisponibilidade de um modelo de simulação do mercado de eletricidade, o efeito *crowding-out* para esse energético não pôde ser analisado, porém seu efeito nas emissões pode ser interpretado observando os resultados da análise de sensibilidade.

A análise de pegada de carbono permite concluir que a precificação das externalidades da gasolina A é a principal variável para que sejam alcançados resultados ainda mais significativos de redução de emissões de GEE. A combinação dessa precificação com o desenvolvimento tecnológico (de etanol 2G e cogeração com aproveitamento de palha) tem potencial de ampliar ainda mais o benefício da expansão do setor.

As emissões de produção de biomassa são pequenas comparativamente aos benefícios, mesmo contabilizando as emissões diretas e indiretas devido à mudança do uso da terra. Tais resultados levam a conclusão que, dadas as características tecnológicas assumidas, o aproveitamento da palha de cana-de-açúcar, quando direcionada para sistemas de cogeração, tende a ter resultados mais expressivos em termos de redução de emissões de GEE que se direcionada para a tecnologia 2G. A análise de sensibilidade em relação à pegada de carbono na margem do sistema elétrico gera intervalos consideravelmente amplos para os cenários tecnológicos com foco na geração de bioeletricidade, mas sem alterar os resultados comparativos entre tecnologias (mesmo ao se considerar uma menor pegada de carbono na linha de base da bioeletricidade).

Os desafios tecnológicos para aproveitamento de palha nos sistemas de cogeração são mais bem conhecidos quando comparados com os desafios da produção do etanol 2G, embora não sejam pequenos e de solução imediata. Se, por um lado, a rota de bioeletricidade permite maior certeza quanto à redução de GEE, os desafios relativos à produção de etanol 2G podem estimular desenvolvimentos não previstos neste estudo, particularmente no que diz respeito ao desenvolvimento em bioquímica e produtos de maior valor agregado. Embora até agora os resultados do desenvolvimento ainda sejam tímidos, há múltiplas oportunidades para a diversificação com a produção de químicos e fármacos, por exemplo.

Vale ressaltar que neste estudo não foram consideradas mudanças nos regimes climáticos que poderiam tornar a produtividade agrícola mais imprevisível. Também foi assumido um ambiente regulatório estável que permite maior previsibilidade e eficiência dos investimentos. Tais premissas podem resultar em projeções otimistas em relação ao que será a realidade mais provável.

O estudo também não considerou explicitamente efeitos de outras políticas NDC que podem afetar diretamente a dinâmica de uso da terra e o consumo de energéticos. Recomenda-se em próximos trabalhos analisar os impactos de políticas voltadas para restauração florestal, intensificação de pastagens, estratégias de mobilidade urbana, eletrificação da frota de veículos, dentre outros.

Por fim, a introdução do CSC no sistema de precificação foi feita de maneira simples, via aumento de incidência de tributação sobre a gasolina A. Existe, porém, uma gama muito maior de possibilidades para tal inclusão, desde redução de tributação sobre renováveis, o desenvolvimento de mercados nos quais o carbono é transacionado, entre outras. Assim, recomenda-se a análise mais aprofundada dos efeitos de diferentes mecanismos no setor de bioenergia, do uso da terra e nos demais setores econômicos, simultaneamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. (2012). **Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil**. Sustainability 2012, 4, 574-585 (doi:10.3390/su4040574)

ADAMS, D. M., ALIG, R. J., CALLAWAY, J. M., WINNETT, S. M., e MCCARL, B. A. **The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): model structure and policy applications**. DIANE Publishing. 1996

AGRAFNP. **Agrianual 2011**. Anuário da agricultura Brasileira, 2011.

ASSAD, EDUARDO; PINTO, HILTON S.; NASSAR, ANDRE; HARFUCH, LEILA; FREITAS, SAULO; FARINELLI, BARBARA; LUNDELL, MARK; FERNANDES, ERICK C.M.. **Impacts of Climate Change on Brazilian Agriculture**. World Bank, Washington, DC. World Bank. 2013
openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18740 License: CC BY 3.0 IGO.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Anfavea apresenta estudo sobre o mercado brasileiro de autoveículos em 2034**. 2014. Disponível em www.anfavea.com.br/docs/06%2011%2014_PressRelease_Estudo_2034.pdf. Acesso em 2016.

BABCOCK, BRUCE A., MOREIRA, MARCELO, YIXING PENG **Biofuel taxes, subsidies, and mandates: impacts on US and brazilian markets**. Fapri Staff Report 13-SR 108. 2013. Disponível em <http://www.card.iastate.edu/products/publications/pdf/13sr108.pdf>. Acesso novembro 2016.

BANCO CENTRAL DO BRASIL,- BCB. **Relatório Focus Novembro de 2016**. Disponível em <http://www.bcb.gov.br/?FOCUSRELMERC>. Acesso em novembro 2016.

BANCO MUNDIAL. **Carbon Pricing: Building on the Momentum of the Paris Agreement**. 2016. Disponível em www.worldbank.org/en/news/feature/2016/04/15/carbon-pricing-building-on-the-momentum-of-the-paris-agreement.print. Acesso agosto 2016.

BONOMI ANTONIO; ADRIANO PINTO MARIANO; CHARLES DAYAN FARIAS DE JESUS; HENRIQUE COUTINHO JUNQUEIRA FRANCO; MARCELO PEREIRA CUNHA; MARINA OLIVEIRA DE SOUZA DIAS; MATEUS FERREIRA CHAGAS; OTÁVIO CAVALETT; PAULO EDUARDO MANTELATTO; RUBENS MACIEL FILHO; TASSIA LOPES JUNQUEIRA; TEREZINHA DE FÁTIMA CARDOSO. **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) 2011 report**. Technological Assessment Program (PAT). Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory. Campinas, 2012.

BONOMI, A., CAVALETT, O., PEREIRA DA CUNHA, M., LIMA, M.A.P. (Eds.). **Virtual Biorefinery: An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization**. 2016. p. 285. Springer International Publishing.

BRASIL. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. 2015. Disponível em http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. Acesso em Dezembro 2016.

BRASIL. **LEI Nº 12.995, DE 18 DE JUNHO DE 2014**. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/Lei/L12995.htm

BRAZIL. **Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Available at www4.unfccc.int/submissions/iNDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf. Accessed in August 2016.

BRESSAN FILHO, A. **Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil**. Superintendência de Informações do Agronegócio, CONAB, 87, 2010.

BRESSAN FILHO, A. **A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil**. 2011.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report: initial statement of reasons for rulemaking: proposed re-adoption of the Low Carbon Fuel Standard regulation**, 2015. Disponível em www.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15isor.pdf. Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Staff report. Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard**. 2009a. Volume I. Disponível em <https://www.arb.ca.gov/regact/2009/lcfs09/lcfsisor1.pdf> Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB. **Board Meeting Comments**, 2009b. Disponível em <https://www.arb.ca.gov/lispub/comm/bccommlog.php?listname=lcfs09>. Acesso em novembro 2016.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Assessment of natural gas combined cycle plants for carbon dioxide capture and storage in a gas-dominated electricity market**. Final Report. 2014.

CANA ONLINE. **Alavancagem média do setor de cana deve crescer 9% em 2015/16, diz Figliolino**. Publicado em 30 julho 2016. Disponível em www.canaonline.com.br/conteudo/alavancagem-media-do-setor-de-cana-deve-crescer-em201516-diz-figliolino.html#.WBpXWi0rKUK. Acesso em novembro de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, M. M. E.. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2015.

CARDOSO, TEREZINHA DE FÁTIMA; OTÁVIO CAVALETT; MATEUS FERREIRA CHAGAS; EDVALDO RODRIGO DE MORAIS; JOÃO LUÍS NUNES CARVALHO; HENRIQUE COUTINHO JUNQUEIRA FRANCO; MARCELO VALADARES GALDOS; FÁBIO VALE SCARPARE; OSCAR ANTONIO BRAUNBECK; LUIS AUGUSTO BARBOSA CORTEZ; ANTONIO BONOMI. **Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system.** Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 353-360, outubro. 2013.

CAVALETT, O; CHAGAS, M.F.; SEABRA, J.E.A.; BONOMI, A. (2012). **Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods.** Int J Life Cycle Assess. DOI 10.1007/s11367-012-0465-0

COALIZÃO BRASIL. **Pós-acordo de Paris. Caminhos para implementação da economia de baixo carbono.** 2016. Disponível em: coalizaobr.com.br/2016/index.php/docs/documentos-da-coalizacao?download=71:pos-acordo-de-paris-caminhos-para-implementacao-da-economia-de-baixo-carbono.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento - Diretoria de Política Agrícola e Informações – Superintendência de Informações do Agronegócio. **A Geração Termoelétrica com a queima do bagaço de cana de açúcar no Brasil. Análise do desempenho da safra 2009-10.** 2011.

CONAB – COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Levantamento de safra.** Available at. <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=criterioSafra1>. Access in August, 2016.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; SCANDIFFIO, M. I. G.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL, R. F.; BONOMI, A. **Simulation of ethanol production from sugarcane in Brazil: economic study of an autonomous distillery.** 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20. 2010.

DIAS, M. O., JUNQUEIRA, T. L., CAVALETT, O., CUNHA, M. P., JESUS, C. D., MANTELATTO, P. E., E BONOMI, A.. **Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane.** Chemical engineering research and design, 91(8), 1411-1417. 2013

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, M.M.E. **Plano decenal de expansão de energia 2024.** Brasília, DF, Brasil: Ministério das Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2015^a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Cenários de Oferta de Etanol e Demanda do Ciclo Otto.** EPE-DPG-SGB-Bios-NT-02-2016. Rio de Janeiro. 2016

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia.** 2016a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE, MME **Balço Energético Nacional 2016**. 2016c Disponível em <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em agosto 2016.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA **Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program**. EPA-420-D-09-001. 2009.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. Renewable energy directive. 2009a. disponível em <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>. Acesso dez 2016.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. Fuel Quality Directive. 2009b. disponível em <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/fuel.htm>. Acesso dez 2016.

EUROPEAN COMMISSION. – EU Commission. **Commission staff working document – impact assessment**. Brussels. 2012. Disponível em https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/swd_2012_0343_ia_en.pdf. Acesso em nov. 2016.

FAO – Food and Agriculture Organisation. Alexandratos, N. and J. Bruinsma. 2012. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. ESA Working paper No. 12-03. Rome.

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., POLASKY, S., e HAWTHORNE, P. **Land clearing and the biofuel carbon debt**. Science, 319(5867), 1235-1238., 2008

FARINA E PHILIPS, 2014b. **UNICA’s Comments on the Updated Indirect Land Use Change Analysis of the Low Carbon Fuel Standard**. 2014b. Disponível em http://sugarcane.org/resource-library/Unica%20comments%20to%20CARB%20iLUC_values%20-%20October%202014.pdf. Acesso em 2016.

FARINA, ELIZABETH; PHILIPS, LETICIA. **UNICA’s Preliminary Comments on Revised Indirect Land Use Change Values**. 2014a disponível em: <http://sugarcane.org/resource-library/UNICA%20LCFS%20iLUC%20revision%20Final.pdf> . Acesso em 2016.

FOOD AND AGRICULTURAL POLICY RESEARCH INSTITUTE – FAPRI. **About FAPRI**. 2016. Disponível em <http://www.fapri.iastate.edu/about.aspx>

FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - FBMC. **IES-Brasil: Cenários de Mitigação**. 2015. Disponível em <http://www.forumclima.org.br/pt/ies-brasil/sobre>. Acesso em out 2016.

FRITSCHÉ, U. AND K. WIEGMANN. **Indirect Land Use Change and Biofuels**. Darmstadt, Germany, Oeko-Institut, Energy e Climate Division., 2011

GLOBAL TRADE ANALYSIS PROJECT – GTAP. **About GTAP**, 2016 disponível em <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>. Acesso em 2016.

GLOBO RURAL. Cana-de-açúcar: **Globo Rural faz balanço da crise do setor**. Edição do dia 05/06/2016. Disponível em <http://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2016/06/cana-de-acucar-globo-rural-faz-balanco-da-crise-do-setor.html>. Acesso em dezembro 2016.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., NASTARI, P. M., & LUCON, O.. **Ethanol learning curve—the Brazilian experience**. Biomass and Bioenergy, 26(3), 301-304. 2004

GOUVELLO, CHRISTOPHE DE. **Brazil low-carbon country case study**. 2010. Disponível em <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US2014602315>. Acesso in August 2016.

GRANVILLE, S., LINO, P., RALSTON, F., BARROSO, L. A., E PEREIRA, M.. **Recent advances of sugarcane biomass cogeneration in Brazil**. In 2009 IEEE Power e Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE. 2009

Gurgel, Angelo Costa, Maluf, Gabriel. **Competição entre o etanol de segunda geração e a bioeletricidade pelo uso do bagaço de cana de açúcar**. SOBER 52º Congresso. 2014

HARRIS, N. L.; GRIMLAND, S.; BROWN, S. **Land Use Change and Emission Factors: Updates since Proposed RFS Rule**. Report submitted to EPA. 2009.

HOLT, MATTHEW T. **A linear approximate acreage allocation model**. Journal of Agricultural and Resource Economics, p. 383-397, 1999.

IEA-RETD. **Towards advanced biofuels – options for integrating 1st and 2nd generation biofuel production**. 2016. Disponível em <http://iea-rettd.org/wp-content/uploads/2016/08/20160202-IEA-RETD-RES-T-BIOPLANT-1.pdf>. Acesso em Dezembro 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Agrícola Municipal**. 2011. Available at: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2009/default.shtm>

INTERAGENCY WORKING GROUP ON SOCIAL COST OF CARBON, UNITED STATES GOVERNMENT - IAWG, U. S. **Technical support document: Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866**. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government, Washington, DC, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 2: Stationary Combustion**. 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC: **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

[B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (org.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2014: Mitigation of 372 Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of 373 the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Biofuels for Transport: an international perspective**. Paris: Chirat, 2004.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2015** (Released on 10 November 2015).

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Statistics**. Available at <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>. Access in august 2016.

INTERNATIONAL MONETARY FUND – IMF. **World Economic Outlook Database WEO, Update, January 2016**. Available at. www.imf.org. Access in February 2016.

IRWIN, SCOTT H., ET AL. **The Value of USDA Outlook Information: An Investigation Using Event Study Analysis**. NCR Conference on Applied Commodity Price Analysis, Forecasting, and Market Risk Management, St. Louis MO. 2001.

JANK, MARCOS; VELASCO, JOEL. **UNICA's Comments on Proposed New Pathways for Brazil Sugarcane Ethanol**. 2009. Disponível em www.arb.ca.gov/lispub/comm/bccommlog.php?listname=lcfs09. Acesso em novembro 2016.

KASTENS, TERRY L., TED C. SCHROEDER, AND RON PLAIN. **Evaluation of extension and USDA price and production forecasts**. Journal of Agricultural and Resource Economics, 244-261. 1998

KLINE, K. L., e DALE, V. H. **Biofuels: effects on land and fire**. Science,321(5886), 199-201, 2008.

LA ROVÈRE, E. L.; WILLS, W.; PEREIRA JR, A. O.; DUBEUX, C. B. S; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, B. C. P.; MOREIRA, M.M.R.; WATANABE, S; LOUREIRO, S. M.; GROTTERRA, C.; HARFUCH, L.; WEISS, M.; SANTOS, L. A. S.; CARVALHO, P.T.; KISHINAMI, R.; ZVEIBIL, V.; SANTOS, L.; ELY, R. N.; MOREIRA, L. S. S.C.; KIMURA, W.; SANTOS, T.; TONI, A.; LEFREVE, J.; BACHION, L. C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; WALTER, M. K. C; ZICARELLI, I.; E OLIVEIRA, L. D. B.. **Implicações Econômicas E Sociais De Cenários De Mitigação De Gases De Efeito Estufa No Brasil Até 2030: Projeto Ies-Brasil**, Forum Brasileiro De Mudanças Climáticas – FBMC. Coppe/Ufrj, Rio De Janeiro, 2016.

LABORDE. **Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies**. ATCLASS Consortium. Implementing Framework Contract No TRADE/07/A2.

2011; disponível em <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll5/id/197>. Acesso em novembro 2016.

LAPOLA, D. M., R. SCHALDACH, J. ALCAMO, A. BONDEAU, J. KOCH, C. KOELKING AND J. A. PRIESS. **Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil**. 2010 Proceedings of the National Academy of Sciences 107(8): 3388-3393.

LEAL, M R L. V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. Em CORTEZ (Corrd) **Bioetanol de cana-de-açúcar P&D para produtividade e sustentabilidade**. Ed. Blusher. P. 561-575, 2010.

LEAL, M. R. L., GALDOS, M. V., SCARPARE, F. V., SEABRA, J. E., WALTER, A., E OLIVEIRA, C. O.. **Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review**. Biomass and Bioenergy, 53, 11-19. 2013.

LEE, H. L., HERTEL, T., SOHNGEN, B., & RAMANKUTTY, N.. **Towards an integrated land use data base for assessing the potential for greenhouse gas mitigation**. GTAP Technical Papers, 26., 2005.

LEITE, ROGÉRIO CERQUEIRA; CORTEZ, LUÍS AUGUSTO B. **O etanol combustível no Brasil. Revista Biocombustíveis no Brasil: Realidades e Perspectivas**, Ministério das Relações Exteriores, 2008.

LINERO. **Aproveitamento da palha da cana de açúcar**. Centro de Tecnologia Canavieira. 16º Seminário Brasileiro Agroindustrial. Ribeirão Preto – Outubro de 2015.

MACEDO, ISAIAS CARVALHO DE (org.). **A energia da cana-de-açúcar doze estudos 384 sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. São Paulo: 385 Berlendis & Vertechia. 237p., 2005.

MACEDO, I.; SEABRA, J. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: **Sugarcane ethanol, contributions to climate change mitigation and environment**. 2008.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., & SILVA, J. E. **Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020**. Biomass and Bioenergy, 32(7), 582-595, 2008.

MCTI - MINISTRY OF SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2º edição. 2014. Available at: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf

MILANEZ, A. Y., NYKO, D., VALENTE, M. S., SOUSA, L. C., BONOMI, A. M. F. L. J., JESUS, C. D. F. D., JUNQUEIRA, T. L. **De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro. 2015.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Fundamentos para iNDC brasileira.** 2016. Disponível em <http://www.mma.gov.br/quem-%C3%A9-quem/item/10710-fundamentos-para-a-elabora%C3%A7%C3%A3o-da-pretendida-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada-indc-do-brasil-no-contexto-do-acordo-de-paris>.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Fundamentos para a elaboração da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) do Brasil no contexto do Acordo de Paris sob a UNFCCC.** Available at www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/Bases_elaboracao_iNDC.pdf. Access in August 27, 2016.

MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy. **Time series of electricity exported by sugarcane mill.** 2011. Available at: <http://www.mme.gov.br/mme>

MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy, **Plano Decenal de Energia 2024.** Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

MME – Ministério de Minas e Energia. Brazilian Ministry of Energy, **Brazilian Energy Balance 2016, Year 2015** / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro 2016. 292 p.: 182 ill. : 23 cm. CDU 620.9:553.04(81).

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. BRAZILIAN MINISTRY OF ENERGY. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia.** Empresa de Pesquisa Energética. Junho/2016. Available at: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf>. Accessed in August 2016.

MOREIRA, M.M.R.; HARFUCH, L.; KIMURA, W.; BACHION, L.C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; DUBEUX, C.B.S.; E WALTER, M.K.C.. **Cenários de AFOLU.** In: LA ROVERE, E. L. et al., 2016 – **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil**, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

MOREIRA, MARCELO, ANDRÉ NASSAR LAURA ANTONIAZZI LUCIANE C. BACHION LEILA HARFUCH. **Direct and indirect land use change assessment.** Em (Cortez and Poppe (org.) Sustainability of sugarcane bioenergy - Updated edition. – Brasília, DF : Center for Strategic Studies and Management (CGEE), 2012. Capítulo 9 p. 207-237.

NASSAR A. M.. **Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agro-industrial and Environmental Impacts.** Relatório Científico Final. 2011.

NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; MOREIRA, M. R.; CHIODI, L.; ANTONIAZZI, L.A. **Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using Brazilian Land Use Model (BLUM).** Report to the U.S. Environmental Protection Agency regarding the proposed

changes to the Renewable fuel standard program. 2009. Available at: <http://www.iconebrasil.com.br/arquivos/noticia/1872.pdf>

NASSAR, A. M., L. HARFUCH, L. C. BACHION AND M. R. MOREIRA. **Biofuels and land-use changes: searching for the top model**. *Interface Focus* 1(224–232). 2011a.

NASSAR, A. M., L. HARFUCH, M. R. MOREIRA AND L. C. BACHION **Simulating Land Use and Agriculture Expansion in Brazil: Food, Energy, Agro-industrial and Environmental Impacts**. FAPESP-PROGRAMA BIOEN. Relatório Científico Final 2011b.

NASSAR, ANDRÉ MELONI; HARFUCH, LEILA; MOREIRA, MARCELO MELO RAMALHO; BACHION, LUCIANE CHIODI; ANTONIAZZI, LAURA BARCELLOS A; SPAROVEK. **Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using the Brazilian Land Use Model (BLUM)**. 2009. Disponível em www.iconebrasil.com.br/datafiles/biblioteca/documentos/2009/impacts_on_land_use_and_ghg_emissions_from_a_shock_on_brazilian_0109.pdf. Acesso em novembro 2016.

NOVACANA.COM. **Futuro brilhante do etanol celulósico está ameaçado**. Disponível em www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/futuro-brilhante-etanol-celulosico-ameacado-010316/. Acesso em outubro 2016.

OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015), **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**, OECD Publishing, Paris. Available at: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en.) ISBN 978-92-64-23203-7.

OLIVÉRIO, J. L. **O estado da arte da tecnologia industrial – As usinas de açúcar e álcool**. Internacional Agroenergy Congress, Teresina, 2007.

PARRY, IAN DIRK HEINE, ELIZA LIS, AND SHANJUN LI. **Getting Energy Prices Right : From Principle to Practice**. International Monetary Fund. July 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5089/9781484388570.071> ISBN:9781484388570. 198p. 2014.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2015. 73p. Relatório apresentado à Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto Campo Futuro. Also data from the same database from 2009 to 2011.

PLEVIN, R. J.; GIBBS, H. K.; DUFFY, J.; YEH, S. **Agro-ecological Zone Emission Factor Model**; University of California: Berkeley, CA; University of Wisconsin: Madison, WI; California Air Resources Board: Sacramento, CA, September 12, 2011.

PRADO JÚNIOR, CAIO. **Formação econômica do Brasil**. São Paulo: Brasiliense, 1967.

PROCANA. Anuário da cana. **Brazilian Sugar and Ethanol Guide**. Guides from 2007 to 2015.

Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

RIGHELATO, R., e SPRACKLEN, D. V.. **Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests?**. Science. 2007

RODRIGUES, L., e BACCHI, M. R. P.. **Light fuel demand and public policies in Brazil, 2003–2013**. Applied Economics, 1-14. 2016

SANTOS, G. R. D., GARCIA, E. A., E SHIKIDA, P. F. A.. **A Crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas**. 2015 http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/radar/150630_radar_39_cap3.pdf.

SATOLO, LUIZ FERNANDO; BACCHI, MIRIAN RUMENOS PIEDADE. **Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar**. Economia Aplicada, v. 13, n. 3, p. 377-397, 2009.

SEABRA, J. E., E MACEDO, I. C. (2011). **Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil**. Energy Policy, 39(1), 421-428.

SEARCHINGER, T.; HEIMLICH, R.; HOUGHTON, R. A.; DONG, F.; ELOBEID, A.; FABIOSA, J.; TOKGOZ, S.; HAYES, D.; YU, T.-H. **Supporting Online Materials for: Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land Use Change**. Science, 115-1861, 2008.

SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., YU, T. H.. **Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change**. Science, 319(5867), 1238-1240. 2008a.

SEARCHINGER, T. **E-letter response to M. Wang and Z. Haq's E-letter: ethanol's effects on greenhouse gas emissions**. Science, 319, 5867. 2008

SOARES-FILHO, B. S., NEPSTAD, D. C., CURRAN, L. M., CERQUEIRA, G. C., GARCIA, R. A., RAMOS, C. A., ELIANE VOLL1, ALICE MCDONALD, PAUL LEFEBVRE3 e PETER SCHLESINGER & SCHLESINGER, P.. 2006. **Modelling conservation in the Amazon basin**. Nature, 440(7083), 520-523.

SOUZA, MENDES, G.; VICTORIA, R. JOLY., C. VERDADE, L (org). **Bioenergy & sustainability: Bridging the gaps**. SCOPE. FAPESP. 2015.

STATE OF CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD – CARB - **Staff report: initial statement of reasons for proposed rulemaking**. Proposed re-adoption of the low

carbon fuel standard regulation. 2015. Disponível em www.arb.ca.gov/regact/2015/lcfs2015/lcfs15isor.pdf

TAHERIPOUR F, TYNER WE. **Biofuels and Land Use Change: Applying Recent Evidence to Model Estimates.** Applied Sciences. 2013; 3(1):14-38. Available at <http://www.mdpi.com/2076-3417/3/1/14/pdf>

TILMAN, D., HILL, J., e LEHMAN, C.. **Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass.** Science, 314(5805), 1598-1600. 2006.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Agreement.** Available at: http://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **The Paris Agreement** (webpage) http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php. |Acesso em novembro 2016.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Center South Brazilian production of sugar, ethanol, and sugarcane crush by mill.** Personal communication. 2016.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **A bioeletricidade da cana em números – agosto de 2016.** Available at: www.unica.com.br/documentos/documentos/. Access in August 2016.

UNICA. **Bioeletricidade em números.** 2016. Outubro de 2016. Disponível em <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em outubro 2016.

UNICA. **Estimativa Safra 2015/2016.** 2015. Disponível em <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em janeiro 2016.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2013.** United Nations Office at Geneva, Geneva (Switzerland). 2015.

UNITED NATIONS – UN. **Paris Agreement.** 2015. Disponível em unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf. Acesso em Dezembro 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA **Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program.** EPA-420-D-09-001. 2009.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Draft Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.** EPA-420-R-10-006. 2009.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis;** US Environmental Protection Agency: Washington, DC, Feb 3, 2010; p 1120.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US-EPA). **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. EPA-420-R-10-006. Fevereiro de 2010. Disponível em <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/420r10006.pdf>. Acesso em agosto 2015.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Regulation of Fuels and Fuel Additives: Changes to Renewable Fuel Standard Program Final rule**. Federal Register / Vol. 75, No. 58 / Friday, 26 Março, 2010. Disponível em <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-03-26/pdf/2010-3851.pdf>; Acesso em Novembro 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) **The Social Cost of Carbon. Fact Sheet**. 2015. Disponível em www3.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/social-cost-carbon.pdf. Acesso em agosto 2016.

UNITES STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis**. EPA-420-R-10-006. Fevereiro de 2010. Disponível em <http://www.epa.gov/OMS/renewablefuels/420r10006.pdf>. Acesso em agosto 2015.

VALIN, HUGO, DAAN PETERS, MAARTEN VAN DEN BERG, STEFAN FRANK, PETR HAVLIK, NICKLAS FORSELL AND CARLO HAMELINCK, JOHANNES PIRKER, ALINE MOSNIER, JURAJ BALKOVIC, ERWIN SCHMID, MARTINA DÜRAUER AND FULVIO DI FULVIO. **The land use change impact of biofuels consumed in the EU Quantification of area and greenhouse gas impacts**. 2015.

VALIN, H., PETERS, D., VAN DEN BERG, M., FRANK, S., HAVLIK, P., FORSELL, N., E SCHMIDT, E. **The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts**. European Commission Ref. Ares (2015)4173087. 2015. Available at https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf

VAN DEN WALL BAKE, J. D.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; POOT, T.; WALTER, A. **Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane**. Biomass and Bioenergy, 2009.

VELDKAMP DIJST, M. J., VERBURG, P. H., SCHOT, P. P.. **Land use change modelling: current practice and research priorities**. GeoJournal, 61(4), 309-324. 2004.

WANG, M. **E-letter: ethanol's effects on greenhouse gas emissions**. Science, 319, 5867. 2008.

WEITZMAN, MARTIN L. **Fat tails and the social cost of carbon**. The American Economic Review, v. 104, n. 5, p. 544-546, 2014