

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS
ESCOLA DE ECONOMIA DE SÃO PAULO

MARIANA REGINA ZECHIN DE LUCCA

ANÁLISE EMPÍRICA SOBRE OS DETERMINANTES DA DECISÃO DE
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA
PAULISTA

SÃO PAULO

2020

MARIANA REGINA ZECHIN DE LUCCA

**ANÁLISE EMPÍRICA SOBRE OS DETERMINANTES DA DECISÃO DE
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA
PAULISTA**

Dissertação apresentada à Escola de Economia
de São Paulo da Fundação Getulio Vargas,
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Economia.

Campo de conhecimento: Microeconomia

Orientador: Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Rodrigues

SÃO PAULO

2020

De Lucca, Mariana Regina Zechin.

Análise empírica sobre os determinantes da decisão de produção de açúcar e etanol na agroindústria canavieira paulista / Mariana Regina Zechin De Lucca. - 2020.

96 f.

Orientador: Angelo Costa Gurgel.

Co-orientador: Luciano Rodrigues.

Dissertação (mestrado profissional MPFE) – Fundação Getulio Vargas, Escola de Economia de São Paulo.

1. Agroindústria canavieira - São Paulo (Estado). 2. Açúcar. 3. Álcool. 4. Análise de painel. 5. Processo decisório. I. Gurgel, Angelo Costa. II. Rodrigues, Luciano. III. Dissertação (mestrado profissional MPFE) – Escola de Economia de São Paulo. IV. Fundação Getulio Vargas. V. Título.

CDU 633.61(816.1)

MARIANA REGINA ZECHIN DE LUCCA

**ANÁLISE EMPÍRICA SOBRE OS DETERMINANTES DA DECISÃO DE
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL NA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA
PAULISTA**

Dissertação apresentada à Escola de Economia
de São Paulo da Fundação Getulio Vargas,
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Economia.

Campo de conhecimento: Microeconomia

Data de aprovação: 29/01/2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel (Orientador)
FGV-EESP

Prof. Dr. Luciano Rodrigues (Coorientador)
FGV-EESP

Prof^a. Dra. Elizabeth M. M. Q. Farina
USP - FEA

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Angelo Costa Gurgel, pela prontidão e confiança em aceitar participar desta pesquisa.

Ao coorientador, Prof. Luciano Rodrigues. Exemplo de profissional e pessoa, seu estímulo, compreensão e ajuda ao longo de todo o curso foram decisivos para a conclusão deste mestrado.

À equipe técnica da União da Indústria de Cana-de-Açúcar, liderada por Antonio de Padua de Rodrigues. Graças à sua competência, hoje o setor sucroenergético brasileiro dispõe de excepcional fonte de informações.

Aos colegas de trabalho, especialmente ao Guilherme Belon e à Celma Ramalho, pelo apoio, conversas e torcida nesses anos.

Aos meus amigos do mestrado. A convivência com vocês minimizaram o cansaço, as preocupações e as inseguranças.

Às minhas amigas de colégio pela alegria inesgotável.

Finalmente, aos meus pais, Zike e Delzia, cuja integridade em todas as ações me incentivam a perseverar, sempre.

Ao meu marido, Jorge, pelo amor e companheirismo. Essa é uma conquista nossa!

RESUMO

Ser capaz de produzir etanol e açúcar a partir da mesma matéria-prima, a cana-de-açúcar, é um diferencial competitivo do setor sucroenergético brasileiro. Sem paralelo no mundo, essa flexibilidade permite às usinas nacionais arbitrar alterações no seu portfólio, adaptando-se às mudanças do mercado mesmo no curto prazo.

Sob este enfoque e considerando a escassez de pesquisas sobre tal flexibilidade, o presente estudo investiga os determinantes da decisão pelas usinas quanto à alocação da matéria-prima entre as produções de açúcar e de etanol. Para tanto, construíram-se dois modelos econômicos, estimados a partir de dados em painel de 119 unidades produtoras de ambas as *commodities*. Trata-se de usinas anexas em atividade nas safras 2010/2011 a 2018/2019 e localizadas no Estado de São Paulo, o principal polo canavieiro do País.

Enquanto um modelo considerou como variável dependente a quantidade fabricada de etanol hidratado (em litros) e de açúcar (em kg) por tonelada de cana-de-açúcar processada, o outro utilizou o mix de produção (a porcentagem do insumo destinada à fabricação de açúcar e de etanol) como elemento endógeno.

Os resultados indicaram que, sobretudo os preços impactam a decisão das usinas no uso da matéria-prima, mas não são os únicos determinantes. Também afetam esse processo decisório as variáveis de natureza técnica, a saber: a qualidade da matéria-prima; os dias em safra; a capacidade produtiva; e o aproveitamento de moagem.

Adicionalmente, calculou-se a elasticidade da oferta pelo método do ponto médio. A oferta mostrou-se inelástica ao preço, totalizando 0,378 para o açúcar e 0,384 para o etanol.

Palavras-chave: Dados em painel; Açúcar; Etanol; Oferta.

ABSTRACT

Being able to produce ethanol and sugar from the same feedstock, sugarcane, is a competitive advantage of Brazil's sugarcane industry. This operational flexibility is unique in the world and allows Brazilian mills to switch between both product outputs in response to changes in market conditions, even in the short term.

Under this approach and considering the absence of studies on the subject, the present research investigates the factors that influence the decision-making process concerning the allocation of sugarcane for sugar and ethanol production. Two models were designed and estimated based on a panel data of 119 mills. All these mills are flexible plants, producing either sugar or ethanol from 2010/2011 to 2018/2019 crop year and located in São Paulo state, the main sugarcane cultivation region in the country.

While one model took as dependent variable the produced amount of hydrous ethanol (in liters) and sugar (in kg) per ton of crushed sugarcane, the other one used the production mix (the share of sugarcane diverted to produce sugar and ethanol) as an endogenous element.

The results indicated that prices were the main factors affecting the mill's decision. However, technical variables also influenced the business strategy, namely: the raw material quality; number of days that the facility was operating during a single harvest season; the production capacity; and the effective use of available milling capacity.

In addition, the supply elasticity was calculated using the midpoint method. The supply was price inelastic, reaching 0.378 for sugar and 0.384 for ethanol.

Keywords: Panel data; Sugar; Ethanol; Supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de unidades industriais em operação no Estado de São Paulo, por tipo de produção, de 1992 até 2018.	13
Figura 2. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar pelas unidades mistas do Estado de São Paulo e preço relativo entre etanol e açúcar recebido pelo produtor no Estado, por safra.	14
Figura 3. Valor da produção dos cinco principais produtos da agropecuária do Estado de São Paulo em 2018.	17
Figura 4. Consumo anual de etanol carburante (hidratado e anidro) e de gasolina A no Estado de São Paulo – 1990 a 2018.	19
Figura 5. Zoneamento Agroambiental da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.	21
Figura 6. Mapa da área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2018/2019 no Brasil.	22
Figura 7. Localização das unidades de processamento de cana-de-açúcar fechadas e ativas em 2019 no Brasil.	22
Figura 8. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar e de etanol pelas usinas anexas e autônomas, em atividade no Estado de São Paulo por safra.	26
Figura 9. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar pelas usinas anexas e autônomas, em atividade nos Estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, por safra.	27
Figura 10. Área cultivada de cana-de-açúcar na safra 2019/2020 por município do Estado de São Paulo (hectares).	28
Figura 11. Localização das usinas anexas e autônomas e mix de açúcar na safra 2018/2019 por mesorregião do Estado de São Paulo.	29
Figura 12. Caminho de expansão, curva de transformação e isoreceita de uma usina anexa. .	31
Figura 13. Evolução semanal do ATR cana no Estado de São Paulo (kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar) ao longo do ano safra.	33
Figura 14. Deslocamentos estimados na oferta de cana-de-açúcar e na demanda de açúcar. .	45
Figura 15. Curva de transformação entre açúcar e etanol	48
Figura 16. Relação ótima de preços entre açúcar e etanol no mercado interno.	49

Figura 17. Determinação das proporções de açúcar e de etanol dada a produção de cana.	51
Figura 18. Determinação dos volumes de açúcar exportado e consumido internamente.	52
Figura 19. Preço do açúcar cristal recebido pelo produtor no Estado de São Paulo e cotação do contrato nº 11 na bolsa de Nova York (convertido em R\$ por saca). Valores registrados entre janeiro de 2005 até agosto de 2019, deflacionados pelo IPCA para agosto de 2019.	65
Figura 20. Evolução semanal da pureza aparente do caldo (%) nas usinas paulistas, para as 4 últimas safras.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Moagem de cana-de-açúcar (milhões de toneladas), fabricação de açúcar (milhões de tonelada) e produção de etanol (bilhões de litros) pelo Estado de São Paulo e pelo Brasil nas cinco últimas safras.....	17
Tabela 2. Perfil de moagem (mil toneladas) e de produção de açúcar (mil toneladas) e de etanol (milhões de litros) por Estado da região Centro-Sul nas safras 2017/2018 e 2018/2019.	25
Tabela 3. Moagem de cana-de-açúcar (milhões de toneladas), fabricação de açúcar (mil toneladas) e produção de etanol (milhões de litros) por mesorregião do Estado de São Paulo nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019.	28
Tabela 4. Elasticidade preço da oferta do açúcar calculada por diferentes fontes.	42
Tabela 5. Descrição das variáveis utilizadas nos modelos A e B.....	70
Tabela 6. Estatísticas descritivas e decomposição da variância para os modelos A e B.....	73
Tabela 7. Estimativas dos determinantes de <i>Ka</i> e <i>Le</i>	79
Tabela 8. Estimativas dos determinantes de <i>mixa</i>	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 A importância do Estado de São Paulo ao setor sucroenergético do Brasil.....	17
2.2 A dinâmica da produção de açúcar e de etanol no Estado de São Paulo.....	21
2.3 A possibilidade de alterar a produção como indutora de competitividade.....	29
2.4 Modelagem sobre a flexibilidade produtiva das usinas.....	34
2.5 Elasticidade-preço da oferta do etanol e do açúcar.....	39
2.6 Modelos de referência.....	42
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 Especificação do modelo.....	53
3.2 Procedimento econométrico.....	55
3.2.1 Regressão com dados empilhados.....	55
3.2.2 Modelo de Efeito Fixo.....	56
3.2.3 Modelo de Efeito Aleatório.....	58
3.3 Testes de especificação do modelo.....	59
3.4 Base de dados.....	62
3.4.1 Preço.....	62
3.4.2 Indicadores operacionais.....	66
4 RESULTADOS.....	71
4.1 Modelo A.....	74
4.2 Modelo B.....	79
5 CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS.....	87
ANEXO.....	94

1 INTRODUÇÃO

A hegemonia brasileira no setor sucroenergético é notável. O País lidera o ranking do cultivo da cana-de-açúcar, respondendo por 40% da produção global (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO, 2017). São cerca de 380 unidades processadoras da matéria-prima, envolvendo 70.000 produtores rurais e 747 mil empregos diretos (UNICA, 2019).

Os principais produtos fabricados a partir da cana-de-açúcar, o açúcar e o etanol, são fundamentais ao protagonismo do agronegócio brasileiro no cenário mundial. Em relação ao biocombustível, o País figura como o segundo maior produtor, superado apenas pelos Estados Unidos. No caso do açúcar, é responsável por quase metade do volume transacionado no mundo, além de historicamente liderar o *ranking* dos países produtores.

Somadas, as exportações de ambas as *commodities* representaram 3% do valor exportado pelo Brasil em 2018, mesmo diante do fluxo internacional ainda incipiente do renovável e das baixas cotações para o açúcar (SECEX, 2019). Trata-se de um montante de US\$ 7,4 bilhões, posicionando o setor como o quarto maior dentre a pauta de exportação do agronegócio nacional, ultrapassado apenas pelos complexos da soja (grão, farelo e óleo), de carnes (bovina, suína e de frango) e de produtos florestais.

Diante dessa magnitude, assume especial relevância a análise minuciosa da dinâmica de produção da indústria nacional sucroenergética. Em particular, destaca-se a sua flexibilidade operacional, isto é, a capacidade de produzir açúcar e etanol a partir do mesmo insumo, a cana-de-açúcar. Esta competência de fabricar ambos os produtos, em escala comercial e em diferentes proporções com a mesma matéria-prima, é exclusiva do Brasil.

Seu entendimento é vital para o melhor planejamento comercial e logístico pelos agentes privados - tanto daqueles que atuam no setor de combustíveis quanto os que operam no mercado internacional de açúcar, cuja oferta reflete os movimentos na produção brasileira. Adicionalmente, é essencial identificar os fundamentos técnicos e econômicos associados ao comportamento da produção, seja para dimensionar novos investimentos, delinear políticas públicas que fomentem o desenvolvimento destes mercados ou ainda como instrumento de otimização da receita.

Durante o período de intervenção estatal no setor, esse tema despertou pouco interesse, pois o arcabouço institucional vigente estabelecia rígidos controles sobre todas as atividades da indústria, do plantio da cana-de-açúcar até a comercialização de seus derivados.

Desde a implantação do Proálcool em 1975 (Decreto nº 76.593 de 1975), até o final da década de 1980, o Poder Público fixava cotas de produção para cada unidade por meio do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), o qual também centralizava as exportações de açúcar. O Instituto adquiria quantidades determinadas de cada usina e as revendia no mercado internacional aos preços correntes, assumindo eventuais ganhos ou prejuízos.

A necessidade de suprir a demanda doméstica de etanol combustível relegava a segundo plano a geração de excedentes exportáveis da *commodity* e qualquer esforço para acessar novos mercados consumidores.

Além desses controles, o governo definia os preços do etanol e do açúcar a partir de uma relação paramétrica, de forma a tornar o produtor indiferente sobre qual item produzir.

Esse cenário mudou a partir de 1990, com a extinção do IAA (Decreto nº 99.240 de 1990) e o início da desregulamentação do setor. A planificação da oferta feita pela União via Planos de Safra desapareceu, tornando qualquer decisão sobre quais itens produzir uma prerrogativa da iniciativa privada a partir de preços fixados pelo mercado.

A despeito da tarifa de exportação e de divergências entre segmento produtivo e governo, a exportação de açúcar cresceu significativamente nesse período. Ao final daquela década, já representava o destino de 50% da produção brasileira. Hoje, este percentual totaliza 70%.

Anexas a muitas destilarias construídas quando da vigência do Proálcool, foram instaladas fábricas de açúcar. Como mostra a Figura 1, no início da década de 1990, quase 50% das unidades localizadas no Estado de São Paulo produziam somente etanol (as destilarias); no ciclo 2018/2019, essa proporção diminuiu para apenas 15%.

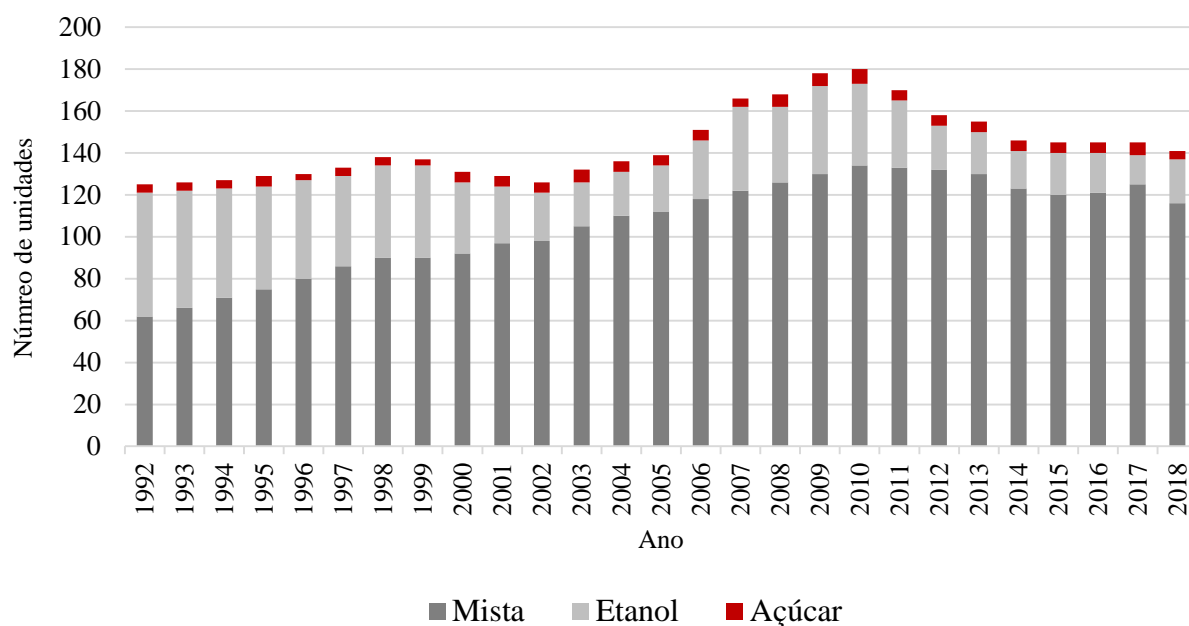


Figura 1. Número de unidades industriais em operação no Estado de São Paulo, por tipo de produção, de 1992 até 2018.

Fonte: UNICA. Nota: elaborado pela autora; categoria mista identifica número de unidades aptas a produzir açúcar e etanol; categoria etanol identifica o número de destilarias, isto é, unidades que produzem somente etanol; categoria açúcar corresponde ao número de unidades que fabricam apenas açúcar. Valores tratam apenas das unidades com moagem efetivamente registrada no respectivo ano.

É nesse contexto que os debates sobre a flexibilidade das usinas ganham destaque. De fato, ser capaz de direcionar a mesma matéria-prima à fabricação de açúcar e de etanol é uma vantagem competitiva exclusiva do setor sucroenergético brasileiro, sem paralelo no mundo. Ela permite à usina diversificar suas fontes de renda, atender as demandas de seus clientes e melhor gerenciar os riscos associados à volatilidade de preços. Não obstante, adiciona enorme complexidade ao planejamento produtivo da unidade, ao envolver diferentes e importantes mercados.

A dinâmica corrente do setor sucroenergético nacional indica outros elementos, não circunscritos à resposta da oferta a mudanças nos preços relativos, como determinantes do mix¹ de produção das usinas. Em outros termos, aparentemente observa-se que a influência dos preços praticados para o açúcar e para o etanol pode não constituir a única variável de escolha que define esse mix.

¹ Termo usado pelo segmento produtivo para designar a proporção de cana-de-açúcar destinada pela usina à fabricação de açúcar e de etanol.

A Figura 2 compara o mix de produção das usinas aptas a produzirem etanol e açúcar (chamadas de usinas anexas²), localizadas no Estado de São Paulo, e a receita relativa entre ambos os produtos comercializados no Estado. Verifica-se que apesar das alterações significativas dessa receita, a mudança na proporção de cana direcionada à fabricação de açúcar não apresenta a mesma intensidade em todo o período. Esse comportamento sugere possíveis restrições de ordem técnica, operacional e financeira associadas àquela escolha.

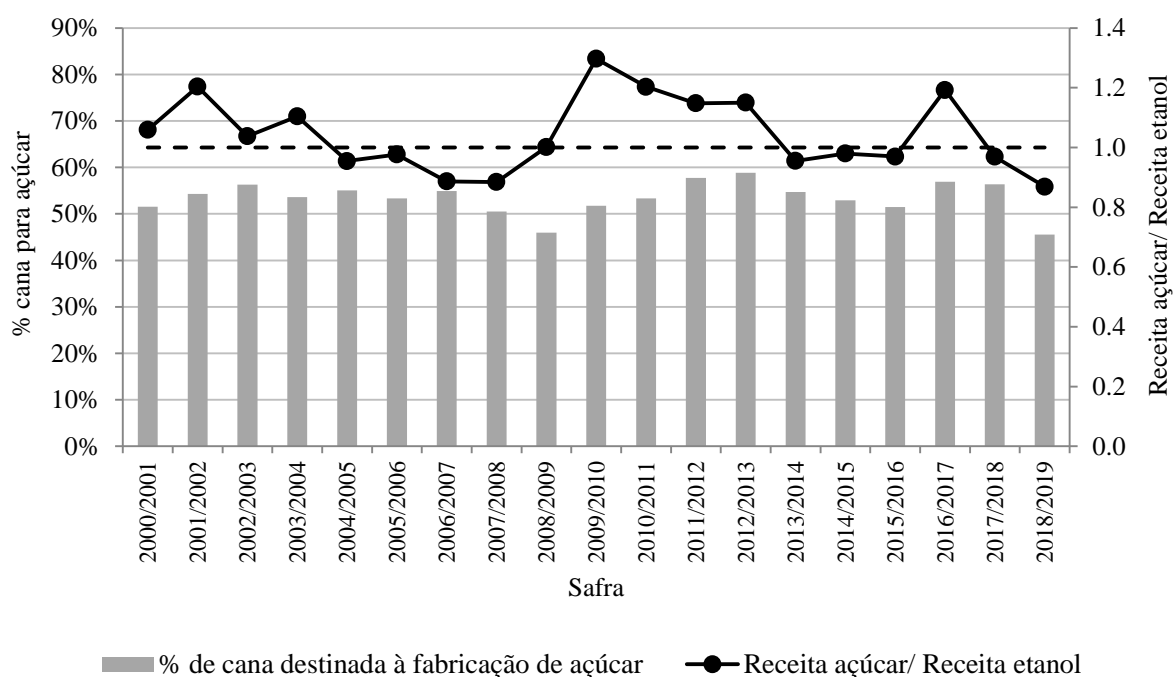


Figura 2. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar pelas unidades mistas do Estado de São Paulo e preço relativo entre etanol e açúcar recebido pelo produtor no Estado, por safra.

Fonte: UNICA e Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (CONSECANA-SP).

Ademais, entre algumas safras subsequentes, a mudança do mix de produção foi contrária ao esperado. Um aumento do percentual retratado na Figura 2 (proporção de matéria-prima destinada à fabricação de açúcar) deveria ocorrer concomitantemente ao incremento da receita pró-açúcar. Porém, entre os ciclos 2007/2008 e 2008/2009, por exemplo, ocorreu o inverso: a queda daquele percentual foi acompanhada pelo aumento da receita obtida com a venda da *commodity* comparativamente àquela auferida com o etanol.

² Termo usado pelo segmento produtivo para designar unidades industriais com fábricas de açúcar anexas e, portanto, com capacidade de produzir açúcar e etanol.

Nessa mesma linha, o mix de produção da safra 2002/2003 (56,27%) foi praticamente igual àquele observado no ciclo 2016/2017 (56,38%), mesmo com comportamentos contrários relativos à receita. Nesse ciclo, a remuneração associada ao etanol ficou acima daquela gerada com o comércio de açúcar, enquanto em 2002/2003 a receita proporcionada pelo biocombustível foi inferior.

Paralelamente a essas alterações no comportamento do mix vis-à-vis os preços relativos, empiricamente pouco se conhece sobre essa relação *stricto sensu*. A literatura que versa sobre essa matéria foca nos choques sobre as produções de etanol e de açúcar ante às mudanças no preço, a partir de certa oferta de matéria-prima e dos parâmetros industriais. Ou seja, mensura a elasticidade preço da oferta, a despeito do volume cultivado de cana-de-açúcar (“efeito cana”) e da sua alocação entre ambas as *commodities* (“efeito mix”).

O presente estudo, por sua vez, centra-se sobre este último efeito exclusivamente, renegando o “efeito cana”. É uma abordagem diferenciada daquelas existentes.

Em suma, diante da importância do tema e da ausência de pesquisas que tenham explorado de forma completa a problemática aqui apresentada, esta pesquisa tem por objetivo investigar o processo de decisão das empresas do segmento sucroenergético do Estado de São Paulo relativo à definição do mix de produção. Trata-se de uma análise empírica que busca identificar e quantificar a influência das principais variáveis associadas à escolha da proporção de cana-de-açúcar direcionada à fabricação de açúcar ou de etanol.

Para atender o objetivo proposto, pretende-se elencar os determinantes desse processo decisório, com base na literatura disponível e na inspeção qualitativa da dinâmica corrente dos mercados de açúcar e etanol. Em seguida, cabe estruturar e estimar um modelo econômico que retrate as ofertas de açúcar e de etanol por tonelada de cana-de-açúcar processada - em especial, que quantifique os reflexos potenciais sobre o mix pelas variáveis elencadas durante o período analisado.

A saber, este período estende-se por nove safras³, de 2010/2011 até 2018/2019, compreendendo dados anuais para 119 usinas paulistas, fabricantes de açúcar e de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Tem-se, portanto, uma pesquisa inédita, em que se pesem a contemporaneidade do tema e o raro acesso a microdados do setor.

De modo a realizar o objetivo delineado, este trabalho divide-se em quatro capítulos, além desta introdução. O próximo capítulo compreende a revisão bibliográfica. Nela se

³ Safra corresponde ao período de abril a março do ano subsequente.

apresenta a lógica produtiva do setor sucroenergético brasileiro, contextualizando a importância do Estado de São Paulo e, desta forma, justificando a sua escolha como objeto de análise deste trabalho. A revisão expõe também as abordagens empíricas que margearam o tema sobre o *trade-off* enfrentado quanto à alocação da matéria-prima.

O terceiro capítulo detalha a metodologia empregada nesta pesquisa, explicitando inclusive o modelo teórico a ser estimado. O quarto capítulo refere-se à apresentação e à análise dos resultados obtidos. Por fim, as conclusões estão contidas no quinto capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A importância do Estado de São Paulo ao setor sucroenergético do Brasil

O setor canavieiro é a principal cadeia do agronegócio paulista. Em 2018, respondeu por 38% do valor gerado por toda a agropecuária estadual (Figura 3). Seu faturamento bruto atingiu R\$ 44 bilhões na safra 2018/2019 (UNICA, 2019).

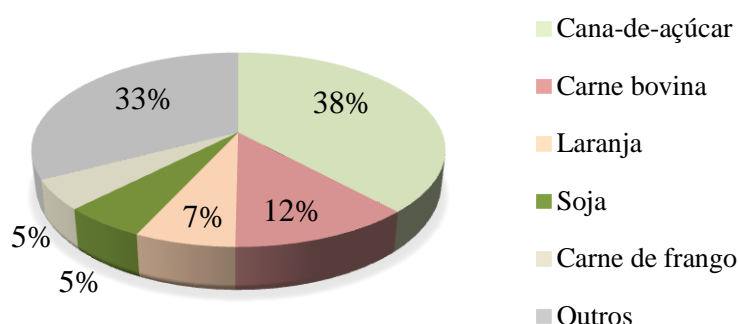


Figura 3. Valor da produção dos cinco principais produtos da agropecuária do Estado de São Paulo em 2018.

Fonte: Instituto de Economia Agrícola (IEA).

Nesse ciclo, processou 333 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 54% da moagem do Brasil (UNICA e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, 2019). A produção de açúcar totalizou 18 milhões de toneladas, enquanto o volume fabricado de etanol alcançou 16 bilhões de litros - 63% e 48% das produções nacionais, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Moagem de cana-de-açúcar (milhões de toneladas), fabricação de açúcar (milhões de tonelada) e produção de etanol (bilhões de litros) pelo Estado de São Paulo e pelo Brasil nas cinco últimas safras.

Safr	Moagem de cana (milhões de toneladas)		Produção de açúcar (milhões de toneladas)		Produção de etanol (bilhões de litros)	
	SP	Brasil	SP	Brasil	SP	Brasil
2014/2015	337	634	22	36	14	28
2015/2016	368	667	22	34	15	30
2016/2017	366	652	24	39	13	27
2017/2018	357	641	25	39	13	28
2018/2019	333	621	18	29	16	33

Fonte: UNICA e MAPA.

Segundo cadastro oficial do MAPA (2019)⁴, das 382 unidades em operação em dezembro de 2019 no País, 162 estão em São Paulo, espalhadas por 469 municípios (dentre 645 cidades paulistas) e com 6 milhões de hectares cultivados (UNICA, 2019). Em Goiás e em Minas Gerais – segundo e terceiro no *ranking* nacional de moagem – localizam-se 73 usinas.

Quanto à empregabilidade, a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) indica 286 mil postos de trabalho formais no setor produtivo em 2018. Assumindo para cada emprego direto pelo menos dois indiretos, chega-se à expressiva marca de 858 mil de pessoas alocadas no Estado em atividades relacionadas ao cultivo da cana-de-açúcar e seu processamento. Esse número é ainda maior se considerado a geração de empregos na cadeia de comercialização, distribuição e revenda de etanol e de açúcar, além dos 14 mil produtores rurais.

Sobre as exportações, aquelas realizadas pelo setor sucroenergético paulista representaram 67% do valor exportado pela indústria canavieira de todo o País na safra 2018/2019 (SECEX, 2019). Foram US\$ 4,53 bilhões em divisas geradas pelo Estado no período, dos quais US\$ 3,67 bilhões referentes ao comércio de 12,90 milhões de toneladas de açúcar.

Baseado nessa cifra e a título de comparação se fosse um país, São Paulo seria hoje o terceiro maior produtor de açúcar do mundo (atrás da Índia e do Brasil) e o segundo maior exportador (superado apenas pelo próprio Brasil).

Dentre os mais de 100 destinos da *commodity* comercializada pelo Estado, os principais foram Índia, Bangladesh e Emirados Árabes Unidos – juntos, responderam por aproximadamente ¼ da exportação entre os ciclos 2016/2017 e 2018/2019. No caso do biocombustível, Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão receberam 90% dos 1,46 bilhão de litros negociados internacionalmente em média por temporada, com destaque às importações americanas (responsáveis por 55% desse volume).

Essa concentração no comércio exterior do etanol deve-se ao seu escasso mercado global: somente 10% da produção mundial são transacionadas (LMC *International*, 2019). Por conseguinte, o renovável destina-se majoritariamente ao suprimento da demanda interna.

Estatísticas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2019) trazem o Estado de São Paulo como o principal polo consumidor de etanol hidratado

⁴ Cadastro referente à posição em 5 de dezembro de 2019.

carburante do País, com 9,96 bilhões de litros comercializados pelos distribuidores de combustíveis em 2018, ou seja, 51% das vendas nacionais daquele ano.

Agregando esse montante (convertido em gasolina equivalente⁵) ao consumo de etanol anidro (2,27 bilhões de litros), a demanda paulista pelo renovável totalizou 9,24 bilhões de litros naquele ano, ultrapassando a de gasolina pura (6,15 bilhões de litros). A exemplo, tal demanda corresponde a mais do que o triplo das vendas em Minas Gerais, segundo maior Estado consumidor de etanol do Brasil.

Essa primazia do renovável em São Paulo é histórica (Figura 4). Na década de 1990, diante da desregulamentação e crise setorial, o uso do derivado fóssil foi maior. Além da extinção dos incentivos públicos à produção, houve duas crises de abastecimento (1989 e 1990) que marcaram profundamente os proprietários dos carros a álcool, com consequente queda nas vendas e rejeição ao produto (MORAES; SHIKIDA, 2002). Mas a partir de 2003, ano de lançamento dos veículos *flex fuel* (aqueles habilitados a rodar com qualquer combinação de gasolina e de etanol), seu consumo cresceu vertiginosamente para, em 2007, superar o de gasolina pura. Desde então, houve a inversão dessa tendência apenas por dois anos (2012 e 2013), fruto da administração dos preços dos combustíveis fósseis pelo Executivo Federal para o controle da inflação brasileira.

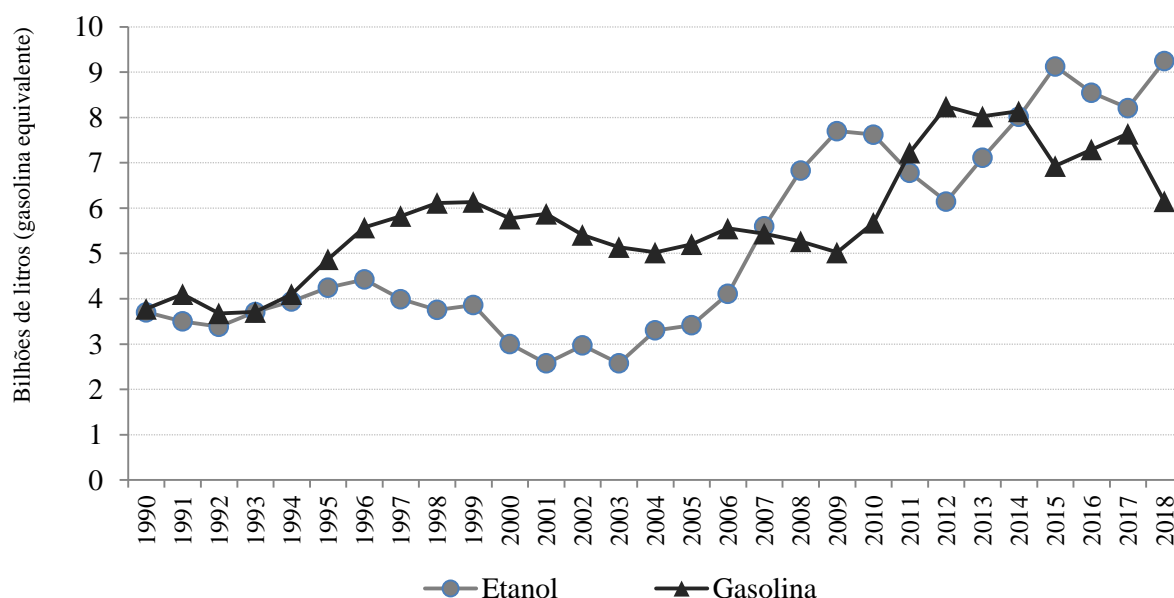


Figura 4. Consumo anual de etanol carburante (hidratado e anidro) e de gasolina A no Estado de São Paulo – 1990 a 2018.

Fonte: ANP. Nota: dados trabalhados pelo autor; valores convertidos em gasolina equivalente.

⁵ O poder calorífico do etanol hidratado é 70% inferior comparativamente àquele apresentado pela gasolina, segundo referencial histórico. Pesquisa do Instituto Mauá indica, porém, que esse diferencial é maior hoje, de até 75,4% (<https://maua.br/imprensa/infomaua/192/texto/812>).

A ampla frota de automóveis *flex* e o diferencial tributário constituem os indutores do alto consumo pelo etanol hidratado em São Paulo. Dentre os 12 milhões de veículos em circulação, 76% são modelos *flex* (UNICA, 2019). Adicionalmente, 1/3 da frota paulista de motocicletas (ou seja, quase um milhão de unidades) têm a mesma tecnologia bicomcombustível.

Sobre o diferencial tributário, destaca-se a Lei Estadual nº 11.593 de 4 de dezembro de 2003, regulamentada pelo Decreto Estadual nº 48.379 de 29 de dezembro de 2003, que reduziu a alíquota do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) do etanol combustível de 25% para 12%, até hoje o menor percentual do País.

Em relação aos diferenciais competitivos associados à oferta, foco da presente pesquisa, cita-se a proximidade entre as usinas e os potenciais consumidores, sejam nacionais (caso do etanol, principalmente) ou externos, favorecidos pelas distâncias factíveis entre centro produtor e terminal de exportação.

De fato, o porto de Santos figura como o principal canal para escoamento das produções nacionais de ambos os produtos ao exterior. Entre 2016 e 2018, movimentou 75% das 25 milhões de toneladas comercializadas anualmente de açúcar pelo Brasil (SECEX, 2019). No caso do etanol, o percentual médio atingiu 90% naquele triênio.

As condições edafoclimáticas vigentes no Estado são propícias ao desenvolvimento dos canaviais (PEREIRA *et al.*, 2015). Elas incorporam, principalmente, a apropriada distribuição das chuvas ao longo do ciclo da cultura. Durante a fase de crescimento vegetativo, a planta requer oferta de água e temperatura elevada; já o seu processo de maturação ocorre diante da redução da disponibilidade hídrica para, então, induzir o acúmulo de açúcares.

O Zoneamento Agroambiental (ZAA) do Estado de São Paulo para o setor sucroenergético ratifica essa aptidão agrícola. Elaborado a partir das características de clima e pedológicas (espacial e temporal) do território paulista, requisitos de preservação da biodiversidade e das exigências biológicas da cana-de-açúcar, o ZAA indica as áreas aptas ao exercício da atividade (Figura 5). Conclui que 99% do cultivo ocorrem em áreas classificadas como adequadas⁶; somente 1% ocupa a região verificada como inadequada (e, para as quais, é indeferido pedido de licenciamento para instalação ou ampliação de unidades agroindustriais).

⁶ No ZAA, as áreas classificadas como adequadas estão divididas em três classes: (i) adequada, (ii) adequada com limitação ambiental, (iii) adequada com restrição ambiental. Da área total do Estado de São Paulo ocupada pela cultura canavieira, (i) 26% está em áreas adequadas; (ii) 45% em áreas adequadas com limitações ambientais; (iii) 28% em áreas adequadas com restrições ambientais.

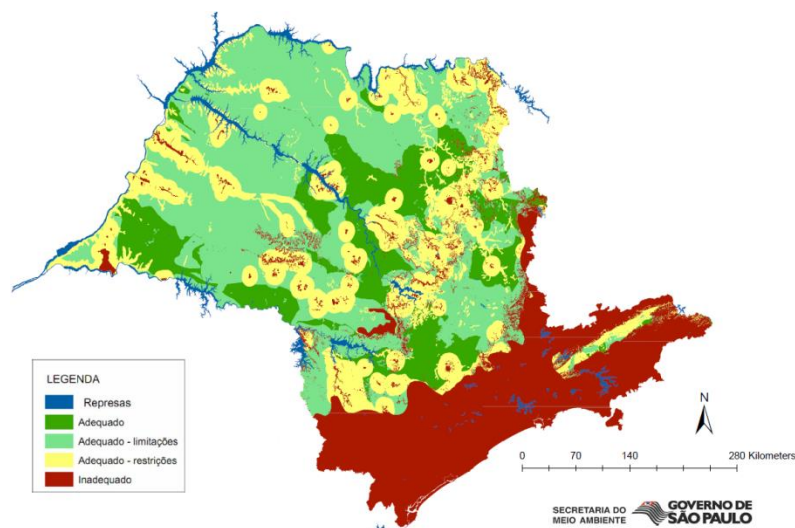


Figura 5. Zoneamento Agroambiental da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Fonte: Secretaria de Infraestrutura e Meio-Ambiente do Estado de São Paulo. Nota: (i) “áreas adequadas” correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e sem restrições ambientais específicas; (ii) “áreas adequadas com limitação ambiental” referem-se ao território com aptidão edafoclimática favorável à cultura canavieira, mas com incidência de Áreas de Proteção Ambiental (APA), de áreas de média prioridade para incremento da conectividade (conforme indicação do Projeto BIOTA-FAPESP) e das bacias hidrográficas consideradas críticas; (iii) “áreas adequadas com restrições ambientais” correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável à cultura da cana, mas com incidência de zonas de amortecimento das Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPI), de áreas de alta prioridade para incremento de conectividade (indicadas pelo Projeto BIOTA-FAPESP) e de áreas de alta vulnerabilidade de águas subterrâneas (conforme publicação IG-CETESB-DAEE – 1997); (iv) “áreas inadequadas” referem-se às UCPI estaduais e federais, aos fragmentos classificados como de extrema importância biológica para conservação - indicados pelo projeto BIOTA-FAPESP - para a criação de UCPI, às Zonas de Vida Silvestre das APAs, e às áreas com restrições edafoclimáticas à cultura da cana (devido às geadas frequentes, ao alto excedente hídrico ou com declividade superior a 20% - o que impede a mecanização).

2.2 A dinâmica da produção de açúcar e de etanol no Estado de São Paulo

A Figura 6 traz as áreas com canaviais no Brasil na safra 2018/2019 identificadas por imagens de satélite. Na região Nordeste, responsável por 8% da moagem nacional no último quinquênio, verifica-se nítida concentração no litoral. Já no Centro-Sul, destaca-se a ampla distribuição das lavouras no território paulista, compreendendo quase toda faixa central e norte – resultado direto da mencionada aptidão edafoclimática do Estado.

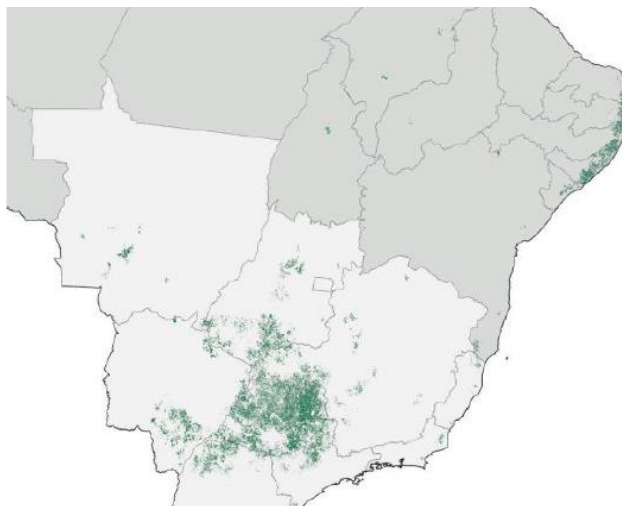


Figura 6. Mapa da área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2018/2019 no Brasil.

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA).

A Figura 7 mostra a localização das usinas de açúcar e de etanol no Brasil, categorizando-as entre ativas e inoperantes em 2019.

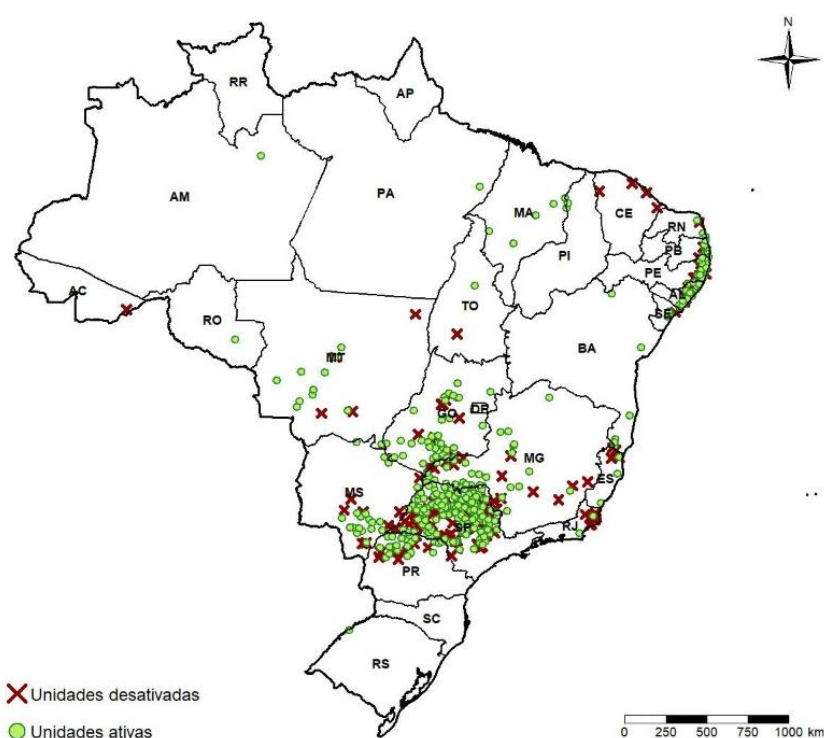


Figura 7. Localização das unidades de processamento de cana-de-açúcar fechadas e ativas em 2019 no Brasil.

Fonte: UNICA.

Da análise conjunta dos mapas (Figura 6 e Figura 7), observa-se a aglomeração das indústrias nas zonas de cultivo da matéria-prima.

De fato, os canaviais estão dispersos por um raio médio de 50 km da usina, devido: ao alto custo de transporte (matéria seca, volumosa, com frete elevado relativamente ao seu preço); e à inviabilidade em compor estoques de cana-de-açúcar (PEREIRA *et al.*, 2015). Ainda, imediatamente depois de colhida, a planta inicia seu processo de degradação química, exigindo sua moagem em até 48 horas para evitar perda de qualidade. Essa perecibilidade demanda um preciso planejamento a fim de assegurar a oferta de matéria-prima em condições de industrialização ao longo de toda a safra.

Paralelamente a essas especificidades locacional e temporal, por ser uma cultura semi perene, ela vincula o produtor à atividade por pelo menos cinco a seis anos, duração média do seu ciclo produtivo. Ou seja, uma vez plantada, sua substituição antes do fim desse ciclo não tem viabilidade econômica.

A observância dessas especificidades é essencial à qualidade da matéria-prima e, conseqüentemente, à rentabilidade industrial.

Ao chegar à usina, o caminhão transportando a cana-de-açúcar colhida é pesado, seguindo-se a coleta e a análise de uma amostra da sua carga no laboratório da unidade. Dessa análise laboratorial derivam diversos indicadores técnicos sobre a supracitada qualidade da matéria-prima (suas características físico-químicas e microbiológicas). Dentre eles, o principal é o Açúcar Total Recuperável (ATR): o teor de açúcares presentes na planta efetivamente conversíveis (“recuperáveis”) nos produtos finais (etanol e açúcar) por ocasião do processamento. Essa métrica é fundamental para orientar a gestão e a eficiência do processo industrial.

Dias *et al.* (2015) detalham esse processo para o ambiente brasileiro. Explicam que as etapas designadas por recepção, preparo e extração do caldo na moenda⁷ são comuns à fabricação tanto do etanol quanto do açúcar.

A produção deste último inicia-se a partir do caldo resultante do primeiro terno de moagem, mais rico em açúcares, passando, então, pela purificação, evaporação, cozimento, cristalização. Em centrífugas ocorre a separação dos cristais de açúcar (sacarose cristalizada que é, depois, seca) do melaço.

Esse melaço, juntamente com o caldo obtido no segundo terno em diante e purificado, formam um mosto. Este é fermentado e misturado com leveduras, gerando o chamado vinho

⁷ Uma moenda é composta por quatro a sete ternos em sequência. Tecnologia mais avançada implica no uso de difusor (separação por osmose) em substituição à moenda.

fermentado. O álcool desse vinho é recuperado em colunas de destilação, resultando no etanol hidratado, utilizado diretamente no abastecimento de veículos. O etanol anidro, usado como aditivo da gasolina, requer desidratação adicional, pois tem graduação alcoólica de apenas 99,5%, aproximadamente.

Parte majoritária do segmento sucroenergético é composta por indústrias equipadas para fabricar ambos os produtos (açúcar e etanol), chamadas de “anexas” ou “mistas”. As demais são as destilarias autônomas, ou somente “autônomas”, que produzem exclusivamente etanol.

Considerando as unidades paulistas com moagem registrada pela UNICA na safra 2018/2019, as anexas processaram 302,04 milhões de toneladas (91% do volume estadual) e as autônomas, as 31,30 milhões de toneladas restantes (9%). Essas últimas, por sua vez, responderam por 16% da produção de etanol de São Paulo (2,55 bilhões de litros).

Contudo, esse perfil diverge dos demais Estados da região Centro-Sul do Brasil, onde as destilarias têm participação mais elevada (Tabela 2). Em Goiás, por exemplo, constituíram 48% da moagem e 38% do volume fabricado do biocombustível.

Tabela 2. Perfil de moagem (mil toneladas) e de produção de açúcar (mil toneladas) e de etanol (milhões de litros) por Estado da região Centro-Sul nas safras 2017/2018 e 2018/2019.

Safr	Estado	Moagem (mil ton)	Produção		Participação das anexas		Mix das anexas	
			Açúcar (mil ton)	Etanol (milhões l)	Moagem	Produção etanol	Açúcar	Etanol
			A	B			F	G
Safr 2018/2019	ES	3.174	147	137	81%	75%	46%	54%
	GO	70.001	1.670	4.892	48%	38%	36%	64%
	MT	17.349	370	1.804	65%	44%	22%	78%
	MS	49.505	944	3.276	60%	51%	26%	74%
	MG	63.063	3.063	3.224	81%	68%	46%	54%
	PR	35.641	2.122	1.615	83%	71%	53%	47%
	RJ	1.058	21	58	61%	53%	30%	70%
	RS	39	-	2	-	-		
	SP	333.338	18.172	15.944	91%	84%	46%	54%
	<i>Centro-Sul</i>	<i>573.169</i>	<i>26.510</i>	<i>30.953</i>	<i>80%</i>	<i>69%</i>	<i>44%</i>	<i>56%</i>
Safr 2017/2018	ES	2.381	127	90	83%	75%	53%	54%
	GO	70.622	2.242	4.618	52%	36%	45%	64%
	MT	16.134	411	1.499	64%	44%	28%	78%
	MS	46.940	1.492	2.632	71%	59%	37%	74%
	MG	64.956	4.241	2.710	86%	72%	57%	54%
	PR	37.047	2.921	1.269	89%	74%	66%	47%
	RJ	1.062	35	46	79%	64%	43%	70%
	RS	45	-	2	-	-		
	SP	357.142	24.591	13.223	95%	88%	56%	54%
	<i>Centro-Sul</i>	<i>596.330</i>	<i>36.060</i>	<i>26.089</i>	<i>86%</i>	<i>71%</i>	<i>54%</i>	<i>46%</i>

Fonte: UNICA (2019). Nota: (i) as colunas A, B e C abarcam os valores apurados pela UNICA para todas as unidades ativas na respectiva safr, tanto anexas quanto autônomas, por Estado; (ii) a coluna D corresponde à moagem estadual das usinas anexas em operação comparativamente à moagem total daquele Estado (registrada na coluna A) – o mesmo entendimento se aplica à coluna E (com a produção estadual de etanol exposta na coluna C); (iii) as colunas F e G referem-se ao percentual da cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar (coluna F) e de etanol (coluna G) considerando estritamente as usinas anexas em atividade no Estado naquela safr.

Essa predominância das anexas em São Paulo reflete diretamente no seu mix de produção - variável chave deste estudo e, por isso, pormenorizada a seguir.

O Estado apresenta um latente e histórico viés açucareiro (Figura 8). Ao longo da última década, houve relativo equilíbrio da alocação da cana-de-açúcar entre ambos os seus subprodutos, próximo a 50% para cada, não ultrapassando a barreira de 60% destinados à produção de etanol e 40% ao açúcar – percentuais observados na última safr (2018/2019) em decorrência das baixas cotações internacionais para a *commodity* e do preço crescente da gasolina, o que ampliou as vendas domésticas do biocombustível.

Ademais, a fração da matéria-prima dedicada à fabricação do alimento (doravante chamada de “mix de açúcar”) aumentou continuamente desde o início dos anos 1990, superando a marca dos 50% em 2001 - percentual contrastante aos 28% registrados em 1992. Esse salto é consonante à tendência discutida no capítulo introdutório, relativa à construção de fábricas de açúcar anexas às destilarias diante do fim do Proálcool.

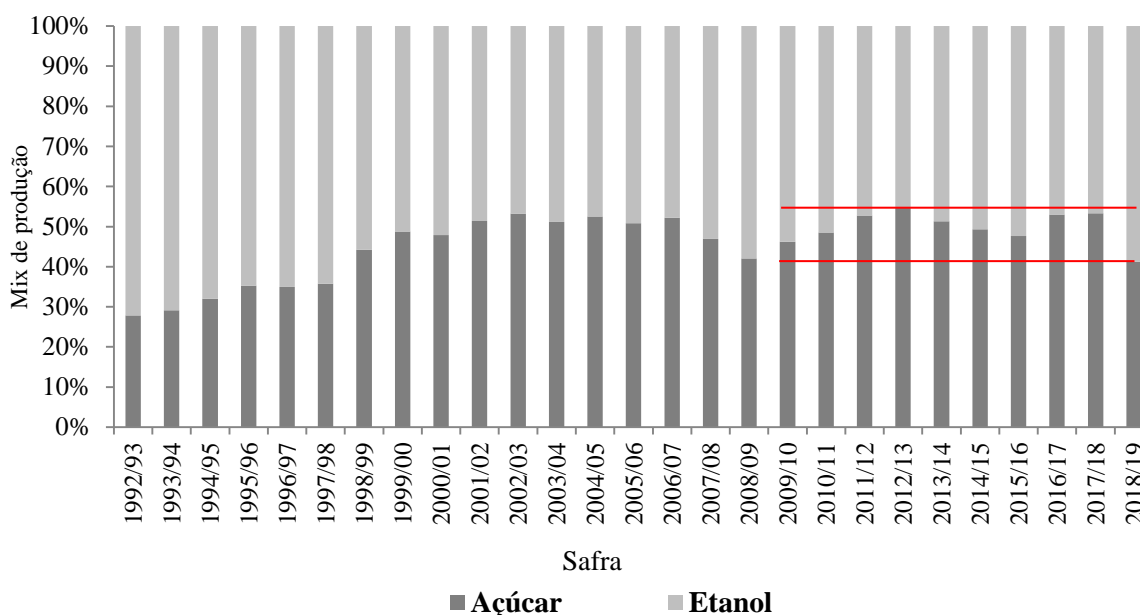


Figura 8. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar e de etanol pelas usinas anexas e autônomas, em atividade no Estado de São Paulo por safra.

Fonte: UNICA (2019). Nota: valores apurados pela UNICA para todas as unidades - tanto anexas quanto autônomas - em atividade no Estado naquela safra.

Somente o Paraná tem um mix de açúcar superior a São Paulo, mas sua produção (2,12 milhões de toneladas na safra 2018/2019 - Tabela 2) é muito inferior a paulista. A Figura 9 que contempla todas as unidades em operação (anexas e autônomas) mostra a constância desse comportamento comparativamente aos Estados que lideraram o *ranking* de moagem na temporada 2018/2019 – quais sejam, São Paulo, Goiás e Minas Gerais (Tabela 2). Desde 2008, quando do ápice do lançamento de *greenfields*⁸ na região Centro-Sul do Brasil - a maioria destilaria em regiões canavieiras não tradicionais, o Paraná apresenta a maior proporção de matéria-prima dedicada à fabricação do adoçante, seguido por São Paulo.

⁸ Na safra 2008/2009, 29 novas unidades iniciaram suas atividades na região Centro-Sul do Brasil, recorde do setor. Entre 2005 até 2010, mais de 100 novas usinas começaram safra na região (UNICA, 2019).

Analisando exclusivamente as anexas, essa característica operacional permanece. Em São Paulo, o mix de açúcar dessas unidades totalizou 46% no ciclo 2018/2019 (Tabela 2).

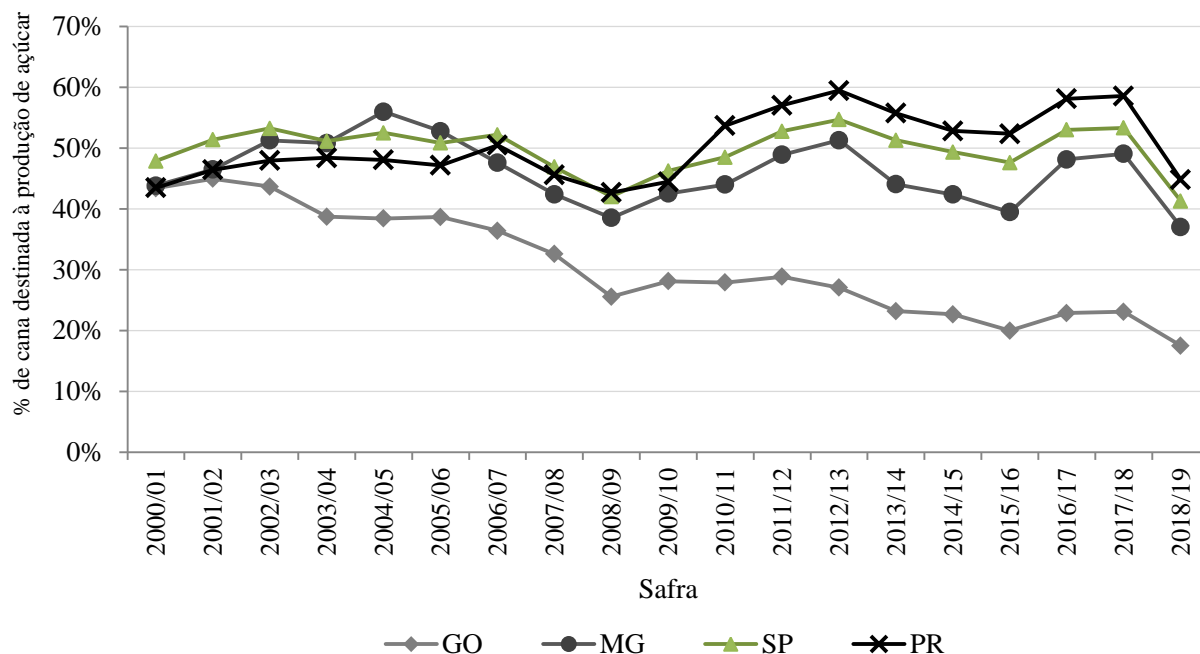


Figura 9. Proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à produção de açúcar pelas usinas anexas e autônomas, em atividade nos Estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, por safra.

Fonte: UNICA (2019). Nota: valores apurados pela UNICA para todas as unidades - tanto anexas quanto autônomas - em atividade no Estado naquela safra.

Partindo do recorte geográfico por mesorregião de São Paulo, determinado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ribeirão Preto figura como aquela com maior moagem e produções de açúcar e etanol, seguido por São José do Rio Preto (Tabela 3). Ambas concentram extensas áreas com canaviais, como mostra a Figura 10.

Tabela 3. Moagem de cana-de-açúcar (milhões de toneladas), fabricação de açúcar (mil toneladas) e produção de etanol (milhões de litros) por mesorregião do Estado de São Paulo nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019.

Mesorregião	Moagem (milhões ton)			Produção açúcar (mil ton)			Produção etanol (milhões litros)		
	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2016/2017	2017/2018	2018/2019
Araçatuba	38	37	32	2.080	2.120	1.310	1.621	1.601	1.822
Araraquara	16	16	15	1.111	1.216	869	546	561	656
Assis	23	22	22	1.483	1.619	1.328	789	726	867
Bauru	38	36	33	2.380	2.275	1.536	1.431	1.465	1.702
Campinas	18	16	15	1.231	1.040	533	544	553	830
Itapetininga	2	2	2	115	124	121	81	87	101
Marília	5	4	4	385	343	306	111	89	111
Piracicaba	20	19	20	1.535	1.438	1.263	558	532	798
Presidente Prudente	25	24	22	1.544	1.494	927	1.029	923	1.196
Ribeirão Preto	102	104	97	7.405	7.740	5.943	3.452	3.685	4.410
São José do Rio Preto	78	77	72	4.978	5.181	4.036	3.035	3.000	3.452
Estado de São Paulo	366	357	333	24.248	24.591	18.172	13.197	13.223	15.944

Fonte: UNICA.

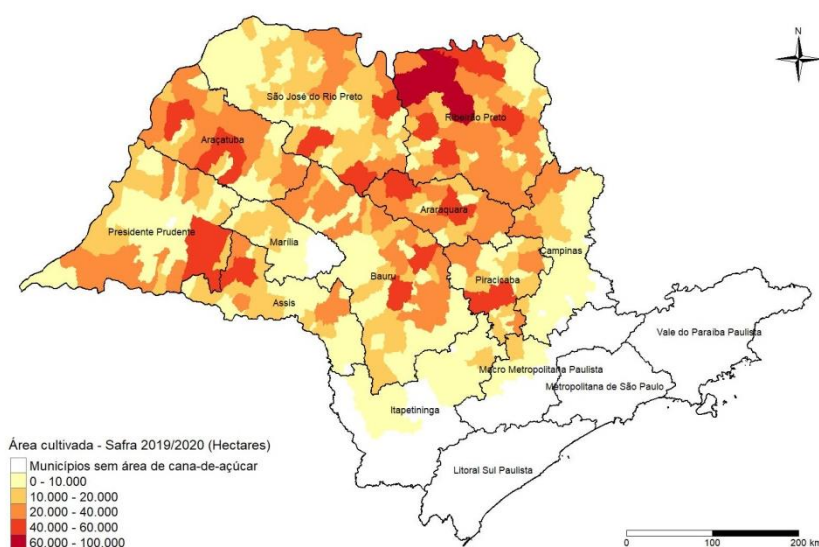


Figura 10. Área cultivada de cana-de-açúcar na safra 2019/2020 por município do Estado de São Paulo (hectares).

Fonte: UNICA. Nota: elaborado pelo autor a partir das áreas mapeadas pela Agrosatélite, conforme pesquisa contratada pela UNICA (2019); delimitações referem-se às mesorregiões do Estado de São Paulo, segundo classificação do IBGE (2019).

Por fim, oportuno retratar a predominância das unidades anexas vis-à-vis o viés açucareiro que norteia a atividade sucroenergética paulista na comparação relativa com os demais Estados do Centro-Sul (Figura 11). De fato, o mix de açúcar predomina nas regiões

Oeste e Norte. Além da oferta de matéria-prima de alta qualidade⁹, contam com pontos de transbordo ferroviário com destino ao terminal portuário de Santos, bem como com transporte intermodal de etanol destinado à base de distribuição de Paulínia.

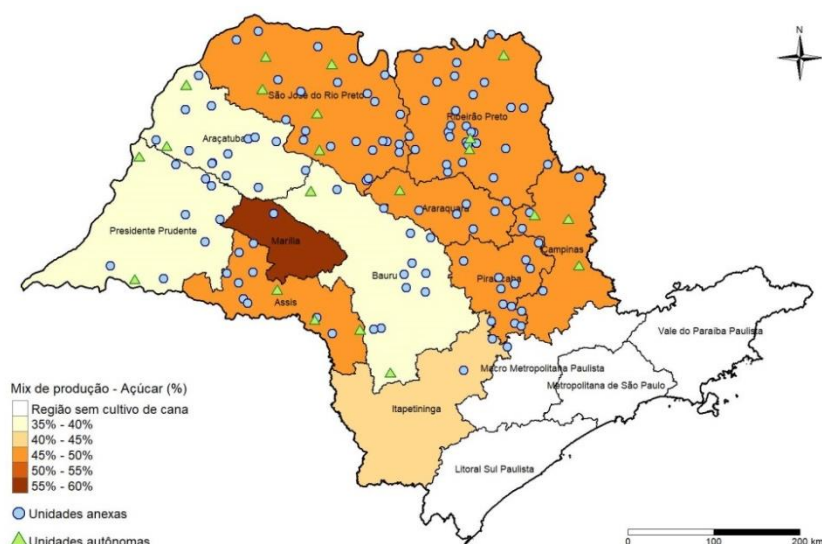


Figura 11. Localização das usinas anexas e autônomas e mix de açúcar na safra 2018/2019 por mesorregião do Estado de São Paulo.

Fonte: UNICA.

2.3 A possibilidade de alterar a produção como indutora de competitividade

Determinantes da demanda relativos ao setor sucroenergético nacional já foram exaustivamente explorados pela literatura especializada. Santos (2013), Rodrigues e Bacchi (2017) e Cardoso *et al.* (2019), por exemplo, abordam em detalhes os impactos relativos à introdução da tecnologia *flex fuel* no País e a dinâmica de substituição entre os combustíveis automotivos¹⁰ pelo consumidor brasileiro.

Entretanto, os diferenciais competitivos associados à oferta ainda carecem de oportuna avaliação. Dentre eles, destaca-se o tema da presente pesquisa: a flexibilidade produtiva.

Segundo definição de Hossiso e Ripplinger (2017), entende-se por “flexibilidade”, a capacidade de alternar entre sistemas produtivos sem custo. No contexto da atividade sucroenergética, significa uma única planta ter a capacidade de produzir etanol e/ou açúcar a partir da mesma biomassa, em uma dinâmica de *trade-off*. Considerando uma unidade

⁹ Dentre as mesorregiões paulistas, têm os maiores índices de kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar.

¹⁰ Etanol hidratado combustível, gasolina e gás natural veicular.

industrial e supondo constante a disponibilidade da matéria-prima, ampliar o volume gerado do biocombustível afeta necessariamente a produção de açúcar (vice-versa).

Essa decisão facultada à unidade sobre qual produto priorizar é chamada mix de produção.

Esse conceito encontra no Brasil (e, por conseguinte, no Estado de São Paulo) uma aplicação contundente, com o caldo da cana-de-açúcar usado para fabricação de ambas as *commodities*. Ainda, como observado no capítulo anterior, existe a possibilidade de fabricar etanol também por meio do mel residual gerado no processo produtivo do açúcar, estabelecendo um canal de comunicação adicional entre esses mercados (DRABIK *et al.*, 2014).

Os autores destacam a estruturação pelo Brasil de um sistema único de produção de bens comercializáveis concorrentes, o açúcar e o etanol, a partir de um insumo não comercializável, a cana-de-açúcar. São as modernas plantas “*flex*” (DRABIK *et al.*, 2014).

Alves (2002) e Marjotta-Maistro (2002) qualificam essa flexibilidade expressamente como uma das mais importantes características da indústria canavieira do País, pois permite às usinas redirecionarem suas atividades frente aos sinais de mercado, ou seja, segundo os preços relativos de seus bens finais, privilegiando o mais rentável.

Similarmente, Pantoja *et al.* (2016) comentam que a incerteza sobre as cotações futuras dessas *commodities*, com o produtor atuando como um tomador de preços, imputa valor a essa autonomia produtiva. Investir em um sistema dotado dessa flexibilidade permite ao tomador de decisão arbitrar entre ambos os produtos conforme a lucratividade que proporcionam.

Oliveira, Ribeiro e Cicogna (2018) vislumbram a capacidade pelas unidades brasileiras em alterar seu mix de produção como importante ferramenta de *hedge* contra a volatilidade de preços, na medida em que açúcar e etanol estão sujeitos a condições de demanda distintas – por exemplo, competem com diferentes produtos substitutos.

Igual consideração cabe a Hossiso e Ripplinger (2017) feita para o contexto de uma planta hipotética¹¹ nos Estados Unidos que utiliza beterraba como matéria-prima. Assumem o etanol e o açúcar como dois ativos passíveis de troca, de sorte que a decisão sobre qual produzir equivale a um *hedge* natural.

Além de instrumento de arbitragem e de proteção às flutuações de preços, o mix de produção evidencia a economia de escopo obtida pelas usinas anexas.

¹¹ Hossiso e Ripplinger (2017) destacam não existir uma usina flexível (fabricante de açúcar e de etanol em uma mesma instalação) nos Estados Unidos até o momento de publicação do artigo.

Conceitualmente, tal economia ocorre quando uma única firma é capaz de produzir dois bens a um custo menor do que aquele incorrido por duas empresas distintas, cada qual fabricando um desses produtos (PANZAR; WILLIG, 1981). Sua origem envolve, por exemplo, o compartilhamento de suprimentos.

A agroindústria canavieira do Brasil configura clara aplicação desse conceito, quando o custo de uma usina anexa, produtora de açúcar e de etanol, mostra-se inferior à soma dos custos de uma destilaria (fabricante apenas do biocombustível) e de uma fábrica exclusiva de açúcar. O uso do mesmo insumo, a cana-de-açúcar, na fabricação de ambas as *commodities* proporciona esse ganho.

Lamounier, Campos Filho e Bressan (2006) retratam graficamente esta economia de escopo ao plotar a curva de transformação côncava. Essa curva, também chamada de fronteira de possibilidade de produção, traz as combinações possíveis de dois diferentes produtos obtidos a partir de um conjunto fixo de insumos. Sua inclinação, denominada de taxa de transformação, define o quanto deve se sacrificar da produção de um dos bens para elevar a quantidade fabricada do outro em uma unidade.

Os autores seguem a análise representando o caminho de expansão da produção, resultante da união dos pontos em que aquela curva tangencia a linha de isoreceita. Assim, no contexto do setor sucroenergético, esse caminho expressa a combinação ótima das quantidades de açúcar (AC) e de etanol (ET) fabricadas a partir de uma moagem fixa de cana, e cujos preços iguais a PAC e PET, respectivamente, maximizam a receita da usina anexa.

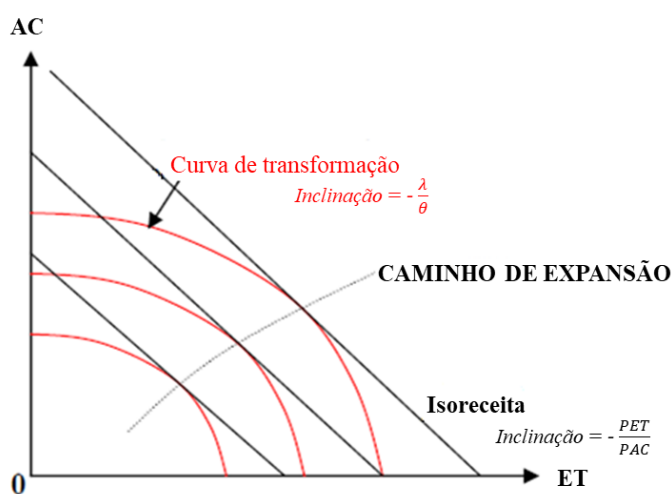


Figura 12. Caminho de expansão, curva de transformação e isoreceita de uma usina anexa.

Fonte: Lamounier, Campos Filho e Bressan (2006). Nota: notação (identificação dos eixos e das inclinações) adaptada pela autora a partir de Campos (2010), onde: (i) λ e θ são os coeficientes técnicos da função de produção do açúcar e do etanol, respectivamente, e representam a taxa de conversão do ATR da cana-de-açúcar em açúcar e etanol; (ii) PAC é o preço do açúcar; (iii) PET é o preço do etanol; (iv) AC é a produção de açúcar; (v) ET é a produção de etanol.

Entretanto, é vital enfatizar que essa flexibilidade produtiva é limitada. Como mencionado anteriormente, o mix médio do Centro-Sul apresentou reduzida oscilação ao longo dos anos. Apesar das variações significativas da remuneração relativa, a proporção de cana-de-açúcar destinada à fabricação de etanol atingiu um valor máximo de 60,3% (safra 2008/2009) e um índice mínimo de 50,4% (safra 2004/2005) no Estado de São Paulo (Figura 8).

Essa rigidez reflete a citada presença de plantas autônomas, responsáveis por 16% da produção estadual do renovável; a capacidade instalada limitada das usinas; e restrições de naturezas comercial e institucional – por exemplo, os contratos fixados com os distribuidores de combustíveis líquidos automotivos visando à oferta contínua de etanol anidro ao longo da safra, para cumprimento de imposição legal (Resolução ANP nº 67/2011, alterada pela Resolução ANP nº 719/2018).

Somados a esses fatores elencados por Bacchi, Lima e Bragato (2011), há outro de caráter financeiro. Conforme destacado por Bacchi e Rodrigues (2018), o mercado de etanol (anidro e hidratado) apresenta maior liquidez comparativamente ao açúcar. O fornecedor do biocombustível recebe o valor correspondente tão logo o produto é entregue aos distribuidores (em média, após 10 dias). Gera-se, portanto, fluxo de caixa com rapidez, aspecto essencial às unidades descapitalizadas.

Por outro lado, Lamounier, Campos Filho e Bressan (2006) lembram que parcela significativa do financiamento setorial advém dos contratos de venda de açúcar a *trading companies*. As instituições financeiras comumente exigem contratos de exportação como garantia para conceder empréstimos em moeda estrangeira. Mas com um mercado internacional de etanol ainda incipiente, poucas são as transações envolvendo a exportação do renovável - ao contrário do açúcar.

O planejamento produtivo exige ainda ponderar sobre “[...] restrições comerciais/contratuais, que podem, em maior ou menor grau, enrijecer a transformação da cana em um derivado ou outro” (CAMPOS, 2010, p. 27). Sob este escopo, cabe aludir à prática de *washout*: o cancelamento do contrato de exportação, previsto em cláusula contratual, mediante pagamento de multa. Em certas circunstâncias, essa operação pode figurar como a melhor alternativa ao produtor. Quando a remuneração com o etanol está atrativa, pode ser vantajoso arcar com *washout* para direcionar mais matéria-prima à sua produção; ou diante de um prêmio elevado para a venda de açúcar ao mercado doméstico; ou se o spread estiver tão alto que torna lucrativo postergar os compromissos de entrega da *commodity* (transação chamada de troca de posições ou “rolagem”), pagar a multa e incorrer em custo de estocagem.

Por fim, vale citar o atributo intrínseco à atividade, que influencia a quantidade e a qualidade da matéria-prima e, por conseguinte, a decisão sobre o mix. Trata-se da origem agrícola do seu principal insumo, a cana-de-açúcar, que impõe variações não planejadas, riscos climáticos e fitossanitários, e sazonalidade à oferta (PEREIRA *et al.*, 2015).

Enquanto as produções de açúcar e etanol se concentram no período de colheita (que perdura, em média, por oito meses), a demanda desses subprodutos se distribui ao longo do ano. Esse descompasso implica na sazonalidade dos preços, menores durante o pico da safra (junho e julho) e maiores na entressafra (fevereiro e março).

Quanto ao clima, nas estações chuvosas, por exemplo, a concentração de sacarose na planta diminui drasticamente, sendo recomendável direcionar maior quantidade de matéria-prima à produção de etanol (SILVA *et al.*, 2015). Em contrapartida, é aconselhável priorizar a fabricação de açúcar em períodos secos, quando tal concentração atinge seus maiores níveis.

Essa dinâmica fica explícita na evolução ao longo de um ano safra do “ATR cana”, indicador resultante das análises laboratoriais de amostras da cana-de-açúcar entregue nas usinas paulistas, responsável por mensurar a quantidade de açúcares totais recuperáveis na matéria-prima processada (Figura 13). É crescente nas semanas iniciais do ciclo agrícola, atingindo seu maior nível (entre 145 a 155 kg de ATR por tonelada) ao final de agosto e início de setembro, quando a partir de então começa a declinar progressivamente.

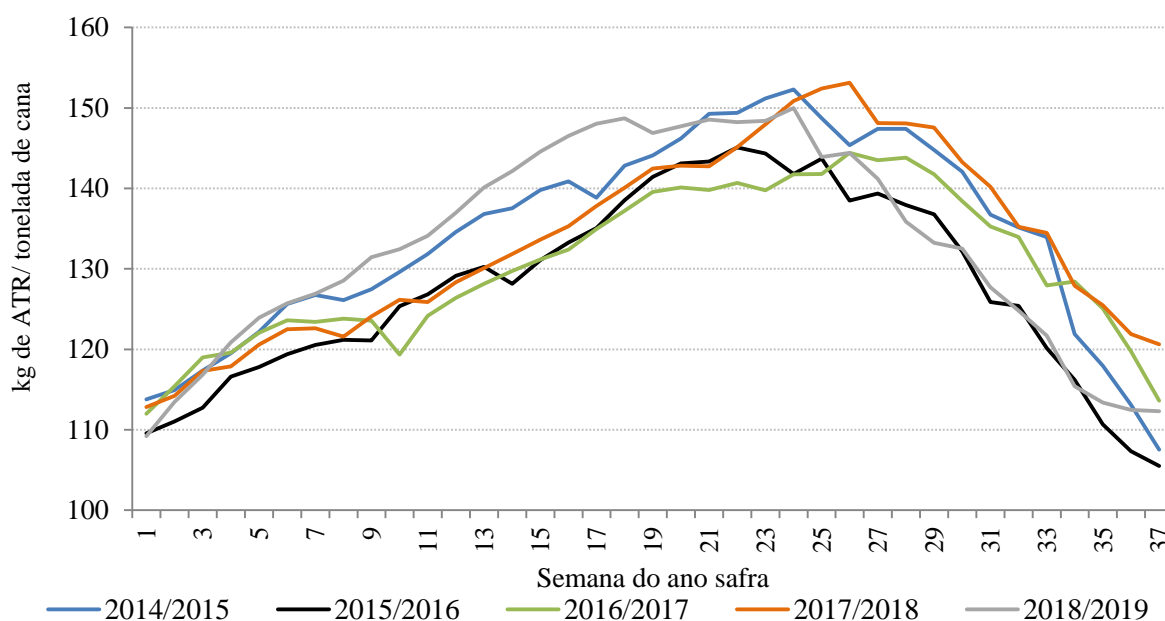


Figura 13. Evolução semanal do ATR cana no Estado de São Paulo (kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar) ao longo do ano safra.

Fonte: CONSECANA-SP.

2.4 Modelagem sobre a flexibilidade produtiva das usinas

Diversos estudos buscaram avaliar e quantificar o benefício monetário associado à possibilidade de as usinas produzirem etanol e açúcar, na comparação com as plantas aptas a fabricar um único produto.

Pantoja *et al.* (2016) valoram unidades flexíveis vis-à-vis aquelas produtoras exclusivas de um dos subprodutos. Concluem que as primeiras figuram como o melhor investimento, operando por maior período e maximizando a geração de receita, esteja ela localizada na região Nordeste ou Sudeste do Brasil.

Os autores empregam a metodologia designada por Opções Reais (OR) para calcular o valor de ter a possibilidade de alternar entre as produções de açúcar e etanol, sendo as cotações futuras de ambos os bens a principal fonte de incerteza. Por sua vez, a simulação dessas cotações fundamentou-se no processo estocástico de Movimento de Reversão à Média (MRM), aplicado aos preços deflacionados para o açúcar e o etanol registrados entre maio de 2003 e julho de 2014. Em linhas gerais, esse método considera que em um mercado competitivo os preços possuem uma tendência natural de reversão ao seu valor médio de longo prazo, a despeito das oscilações em resposta às alterações nos fundamentos de mercado e da velocidade deste movimento de reversão.

Previamente, Bastian-Pinto, Brandão e Hahn (2009) desenvolvem pesquisa bastante semelhante. Endereçam a teoria de OR para valorar a flexibilidade de uma usina no Brasil, aplicando a técnica de MRM para modelar os preços mensais do açúcar e do etanol apurados entre 1998 e 2008. Em seguida, utilizam a árvore de eventos para o apreçamento das opções e verificam, tal como Pantoja *et al.* (2016), um maior valor oriundo de uma unidade anexa. Especificamente, observam que o valor presente do fluxo de caixa operacional gerado ao longo de cinco anos pelo processamento de 2,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, é superior para esta unidade comparativamente a outras sem flexibilidade.

Além do MRM, o Movimento Geométrico Browniano (MGB) figura como outro processo estocástico comumente empregado na simulação dos preços de ativos no escopo da OR (KOZLOVA, 2017). Hossiso e Ripplinger (2017) aplicam ambos (MGB e MRM) sobre as cotações futuras do açúcar e do etanol e os utilizam como parâmetros, além dos custos de produção, para: i) valorar o projeto de uma biorefinaria flexível a partir da beterraba nos Estados Unidos; e, ii) avaliar as regras de decisão quanto ao mix ótimo (em quais intervalos de preços deve-se alterar o mix e em prol de qual produto).

Já Oliveira, Ribeiro e Cicogna (2018) aplicam um modelo de Espaço-Estado (Filtro de Kalman) para obter as previsões dos preços do açúcar e do etanol. Os autores desenvolvem um modelo de otimização para minimizar o risco financeiro enfrentado pelas usinas brasileiras ao definir as estratégias ideais de formação de estoques, mix de produção e *hedge* via derivativos, restringindo a análise às safras 2007/2008 a 2013/2014 e a quatro cenários econômicos.

Contudo, os autores alertam que “embora os produtores possam enfrentar diferentes tipos de incerteza, neste estudo apenas se considera a incerteza de preços” (OLIVEIRA; RIBEIRO; CICOOGNA, 2018, p. 518, tradução nossa). Atentam ainda que a decisão sobre quanto produzir de açúcar e de etanol depende dos seus preços sujeita a restrições operacionais, mas não especificam ou calculam quais são elas.

De forma similar, Pantoja *et al.* (2016) abordam estritamente a incerteza relativa aos preços futuros quando da análise de investimento de uma usina flexível no Brasil. Reconhecem, entretanto, a existência de outras potenciais variáveis com impacto sobre o fluxo de caixa.

A presente pesquisa busca suplantar essas limitações, incorporando os fatores que influenciam a escolha do mix pelas usinas, além dos preços dos seus subprodutos.

Com efeito, os resultados de Lamounier, Campos Filho e Bressan (2006) já sugerem que esses preços não influenciam estrita e exclusivamente a decisão alocativa da indústria no curto prazo. Os autores examinam esse efeito para as unidades anexas da região Centro-Sul do Brasil entre 2001/2002 a 2004/2005, e utilizam o modelo de oferta condicionada para dados em painel chamado de regressões aparentemente não-relacionadas (ANR ou SUR na sigla em inglês de *seemingly unrelated regression*). Para vários dos Estados e das safras avaliadas, verificam que o aumento (queda) da cotação do açúcar implicou no recuo (crescimento) da sua produção relativa, ocorrendo o mesmo para o etanol.

Outras variáveis, senão os preços dos produtos ao longo da safra deverão interferir na escolha do empresário entre produzir um produto em detrimento do outro. As variáveis de demanda de açúcar e álcool, a capacidade instalada, a taxa de câmbio, o histórico de comercialização juntamente com a estrutura comercial que cada usina possui são características que devem ser incorporadas em uma futura análise, para se melhor quantificar a magnitude e as características com que esse *trade-off* pode ocorrer (LAMOUNIER; CAMPOS FILHO; BRESSAN, 2006, p. 20).

Campos (2010) também disserta sobre fatores idiossincráticos, além daqueles de natureza macroeconômica¹², que afetam os preços domésticos do etanol e do açúcar. Dentre esses fatores, encontram-se a produtividade e o clima e, para captá-los, a autora incorpora o índice de pluviosidade como variável. Constatamos que seu uso melhora o poder preditivo do modelo, estimado via Vetores Auto-Regressivos (VAR).

Outra potencial contribuição da presente pesquisa consiste em abordar a temática da flexibilidade produtiva. Por exemplo, embora exista um crescente número de trabalhos acadêmicos sobre o uso da teoria de OR na análise de projetos de energias renováveis (inclusive biocombustíveis), raros são aqueles que a utilizam na avaliação de ativos com alternância de produtos/insumos (KOZLOVA, 2017). Esta alternância é chamada pela literatura pertinente como *switch option*.

[...] valorar a opção de troca significa valorar a flexibilidade de poder intercambiar entre diversos *inputs* e/ou *outputs* em um processo produtivo, com o objetivo de atingir o maior lucro de acordo com as flutuações dos preços (PANTOJA *et al.*, 2016, p. 231).

Além da troca de insumos/produtos, a teoria de OR permite que outras flexibilidades gerenciais sejam incorporadas à análise de investimentos sob condição de incerteza, como: postergar, abandonar, alterar a escala, fracionar ou expandir um projeto; paralisar ou retomar suas operações (KOZLOVA, 2017).

No que tange às pesquisas sobre transmissão de preços dos subprodutos da cana-de-açúcar, existem estudos referenciais para diferentes mercados e níveis da cadeia produtiva e de comercialização no Brasil. Embora tenham objetivos diversos e avaliado períodos distintos (inclusive momentos em que o setor ainda operava em um ambiente com forte intervenção estatal), seus resultados trazem indicações relevantes para a análise proposta. Em especial, confirmam a dinâmica peculiar da agroindústria nacional sucroenergética.

Trata-se de um setor agrícola que produz e comercializa açúcar, cujo comportamento dos preços segue padrão similar ao das demais *commodities* agrícolas, mas que também atua no mercado de energia, com a produção e a venda de etanol e de bioeletricidade. Essa estrutura torna-se mais complexa ao se considerar a condição única do produto no mercado nacional de combustíveis, uma vez que é utilizado como aditivo (etanol anidro) e substituto (etanol

¹² Evolução da tecnologia e da produtividade; amplos eventos climáticos excepcionais; mudanças nas estruturas dos mercados; políticas econômicas de países influentes; crescimento econômico; taxa de juros; câmbio; eventos que afetem a percepção de risco.

hidratado) da gasolina nos veículos *flex* (BACCHI; RODRIGUES, 2018, p. 241).

Melo e Sampaio (2016) utilizam o modelo de Vetores Autorregressivos (VAR) ao examinarem como tais ofertas respondem a choques nos preços do etanol, do açúcar e da gasolina entre julho de 2001 até março de 2012. Por meio das funções impulso-resposta e decomposição da variância, concluem que o produtor brasileiro responde mais intensamente a mudanças no preço do açúcar. Justificam esse comportamento pela robustez do mercado internacional da *commodity* e pela tradição exportadora do produto pelo País, o que “pode influenciar na decisão do produtor em produzir açúcar em detrimento ao etanol” (MELO; SAMPAIO, 2016, p. 67).

Já Lima *et al.* (2019) recorrem ao arcabouço da Econofísica - a saber, os métodos *Detrended Cross Correlation Analysis* (DCCA) e *Detrended Partial Cross Correlation Analysis* (DPCCA) – para investigar correlações entre as cotações internacionais do petróleo e os preços domésticos do etanol e do açúcar registrados semanalmente entre julho de 2000 e março de 2016. Entre os pares das séries analisadas, constata-se elevada associação entre aquelas relativas ao açúcar-etanol, tanto para o retorno¹³ quanto para a volatilidade entre elas. É inclusive a maior correlação dentre aquelas igualmente positivas e crescentes na escala temporal - quais sejam, a volatilidade entre açúcar-petróleo e o retorno entre etanol-petróleo.

Os autores atribuem esse resultado à flexibilidade das usinas brasileiras. Ela permite aos mercados domésticos de açúcar e de etanol reagirem rapidamente frente às oscilações aos preços do petróleo, dirimindo as correlações a ele pertinentes. Intuitivamente, isso significa que o direcionamento de cana-de-açúcar à fabricação de etanol, decorrente de um aumento no seu preço interno, afeta mais o preço do açúcar (elevando-o¹⁴) do que mudanças na cotação internacional do petróleo (que influencia o preço do alimento diretamente via custo de transporte e de forma secundária, através do mercado de etanol).

Semelhante a Lima *et al.* (2019), David, Inácio Júnior e Machado (2019) conduzem uma análise bivariada dos preços diários praticados no Brasil entre janeiro de 2011 e dezembro de 2018, para o etanol vis-à-vis sete produtos fundamentais ao agronegócio nacional (açúcar, algodão, boi gordo, café arábica e robusta, milho e soja). Usam o teste de Bai-Perron, que determinou cinco subperíodos - conforme as quebras estruturais observadas

¹³ Volatilidade (V_t) corresponde ao valor absoluto do retorno R_t , definido como $R_t = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1})$ em que P_t é o preço da *commodity* na semana t .

¹⁴ Alta do preço do etanol aumenta sua produção e, conseqüentemente, reduz a fabricação de açúcar, posto que ambas as *commodities* usam a cana-de-açúcar como matéria-prima. No longo prazo, tem-se uma demanda por açúcar superior à oferta, resultando na alta de preço.

para a série do renovável; o teste de cointegração de Johansen; e o modelo vetorial de correção de erros (VECM).

Os resultados indicam a maior transmissão dos preços do etanol aos das *commodities* – não no sentido oposto. Esse comportamento deriva da alta demanda de energia (e, portanto, de combustível) pela produção agropecuária.

Sobre a relação entre etanol e açúcar, observam que os choques se propagam mutuamente (em ambas as direções) para o primeiro intervalo (entre janeiro de 2011 a maio de 2012), porém não para os subperíodos seguintes considerando as quebras estruturais.

Em contrapartida, Bentivoglio, Finco e Bacchi, (2016) não encontram evidências estatísticas para uma transmissão recíproca dos choques, mas sim unilateral em que o açúcar (e a gasolina) influencia a precificação do biocombustível no longo e no curto prazos. A partir de dados semanais entre novembro de 2007 e novembro de 2013, constata-se que o preço do alimento Granger causa aquele apurado para o renovável, mas este último não afeta (no sentido de Granger) a cotação do açúcar. Segundo o parâmetro estimado do VEC, uma variação de 1% nos preços do açúcar inflaciona o etanol em 0,2%. Ainda, tal variação induz a um incremento a partir da primeira semana no valor do biocombustível, que segue crescente até atingir seu máximo (0,9%) na décima semana para, então, permanecer nesse maior patamar, segundo a função impulso resposta e a decomposição da variância. Pelo contrário, um desequilíbrio de 1% no preço do renovável não impacta o do açúcar.

De acordo com os autores, essa racionalidade em que um preço maior para o açúcar ocasiona o aumento daquele apurado para o etanol decorre da cana-de-açúcar responder por parte considerável do custo de produção de ambos os produtos (60%). A não observância de impacto no sentido inverso mostra que o preço doméstico do açúcar depende, sobretudo, das suas cotações internacionais. Citam também que alterações no valor do etanol em nível devem-se à quantidade de matéria-prima processada e ao mix.

Dutta (2018) obtém a mesma conclusão de Bentivoglio, Finco e Bacchi (2016) quanto a influência unidirecional do açúcar (e do petróleo) sobre a precificação do etanol brasileiro no longo prazo. Explora, porém, estatísticas semanais entre 2003 e 2016.

Similarmente, Carpio (2019) examina o efeito das previsões de longo prazo para a cotação do petróleo sobre as estimativas de preços do etanol, da gasolina e do açúcar no Brasil. Usa o método de VEC e dados relativos a julho de 2001 a dezembro de 2018.

Janda e Kristoufek (2019) mapearam diversos outros estudos econométricos, com enfoque em séries temporais, sobre as relações de preços entre alimentos e combustíveis, fósseis e os renováveis etanol e biodiesel. No entanto, alertam que essas relações evoluem de

forma dinâmica e dependem do país em apreço. Adicionalmente, outros fatores influenciam as inferências numéricas: as premissas específicas subjacentes a cada modelo; o ferramental econométrico; a frequência dos dados; o intervalo temporal considerado.

Não obstante, é inegável a contribuição dessas análises ao desenvolvimento da presente pesquisa, especialmente quanto aos corolários sobre as conexões entre os mercados de açúcar e de etanol.

Entretanto, a bibliografia disponível e ora revisada contempla essas conexões via preços, sem pormenorizar os fundamentos associados à ótica da produção. Nesse sentido, fica evidente a ausência de trabalhos científicos que abordem essa temática; em especial que explorem a resposta da produção das unidades anexas frente a alterações nos preços do etanol e do açúcar.

Assim, o presente estudo visa suprir essa lacuna, ampliando o escopo das análises empíricas disponíveis.

2.5 Elasticidade-preço da oferta do etanol e do açúcar

Esta seção apresenta os resultados de estudos nacionais e internacionais quanto à resposta da oferta do açúcar e do etanol às oscilações de preço. Trata-se de uma revisão sucinta, sem qualquer pretensão de esgotá-la.

No que tange ao açúcar, Barros (1975) obteve elasticidades de 0,25 e de 3,94 para o curto e o longo prazo, respectivamente. Utilizou a técnica de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) aplicado a séries temporais de 1947 a 1973, de abrangência nacional.

Arend (2001) também mensurou essas elasticidades para o curto (0,33) e o longo (0,98) prazos, abarcando, porém, o período de intervenção estatal na atividade canavieira e sua posterior desregulamentação (1969 a 1998). Recorreu ao método de MQO em dois estágios, estimando a oferta brasileira de açúcar a partir da produção defasada; do preço corrente e defasado; do volume exportado; e de uma *dummy* indicativa do abrupto aumento da exportação em 1990.

Tal como Barros (1975), Arend (2001) observou a mesma discrepância na temporalidade da resposta da produção frente à variação de preço.

Analisando estritamente o Estado de São Paulo com dados entre janeiro de 1995 a outubro de 2000, Caruso (2002) concluiu que a oferta de açúcar cristal é elástica ao preço no curto prazo. Um aumento de 1% no preço do açúcar cristal nesse Estado resulta em uma

ampliação da quantidade ofertada em 1,89%. Já um incremento da cotação internacional da *commodity* reduz em 4,23% a sua oferta no mercado doméstico.

Ambos os coeficientes mostraram-se estatisticamente relevantes a 10%. Mas aquele relativo ao preço do etanol hidratado, igualmente incorporado à função representativa da oferta paulista de açúcar, revelou-se não significativo, frustrando a expectativa da autora em retratar o potencial grau de substituição entre ambos os produtos.

Dias, Alves e Shikida (2009) também constataram a não significância estatística do preço do etanol sobre a produção de açúcar. Por meio de um procedimento econométrico baseado em teste de raiz unitária e cointegração, os autores avaliaram as ofertas destas *commodities* no Estado do Paraná entre 1981 a 2006.

Os demais determinantes dessas ofertas apresentaram os sinais esperados, bem como significância estatística. Particularmente, as elasticidades de preço relativas à produção de açúcar totalizaram 0,73 e 0,37 quando referenciadas aos preços praticados no mercado interno e à cotação mundial, respectivamente.

Esta análise confirma a pré-disposição da indústria açucareira em destinar pelo menos parte de sua produção ao mercado nacional, enquanto a estrutura de contratos de venda (antecipada) para o exterior da agroindústria açucareira continua sendo determinante para que sua oferta responda menos do que proporcional aos estímulos do preço internacional (DIAS; ALVES; SHIKIDA, 2009, p. 30).

Na bibliografia internacional, análises relativas à indústria açucareira examinam os efeitos sobre o bem-estar das políticas comerciais (protecionistas e liberais) e, por conseguinte, contemplam elasticidade de preço.

Muitas dessas análises não estimam elasticidade, mas utilizam aquelas computadas pelo *Food and Agricultural Policy Research Institute* da Universidade de Missouri (FAPRI - MU). O instituto é responsável por elaborar projeções para os mercados agrícolas dos Estados Unidos e internacionais. Dentre esses estudos, cita-se o de Elobeid e Beghin (2006) e Schmitz (2018).

Já Devadoss e Kropf (1996) mensuram a elasticidade preço do açúcar para 21 países e regiões, incluindo o Brasil e a União Europeia, entre 1970 e 1992. Para o bloco, o indicador variou entre 0,215 a 0,228 conforme quotas lá vigentes, praticamente igual ao resultado médio de 0,23 obtido por Gohin e Bureau (2006) para sete Estados-Membros entre 1981 e 2004.

Em relação ao etanol, poucos são os estudos que dispõem sobre a elasticidade de produção, refletindo o ainda incipiente mercado para o biocombustível. Marjotta-Maistro e

Barros (2003) observaram uma oferta altamente inelástica ao preço (0,084) para o etanol anidro no Brasil, entre janeiro de 1995 a dezembro de 2000.

Em Oliveira, Alencar e Souza (2008), a oferta brasileira de etanol seguiu inelástica (0,207) entre 1995 e 2006. Neste estudo, a única variável exógena considerada corresponde ao preço do renovável, além de uma *dummy* indicativa da alta das cotações internacionais do petróleo no período de 2002 a 2006.

Dias, Alves e Shikida (2009) constataram um crescimento de 0,77% na oferta de etanol (total) frente a uma expansão de 1% em seu preço para o Estado do Paraná.

Recentemente, Costa *et al.* (2015) fixaram a oferta brasileira de etanol hidratado como função do seu preço e daqueles praticados para o açúcar e o etanol anidro. Estimaram tal modelo por Efeito Fixo (EF) para dados em painel, composto pelos principais Estados¹⁵ produtores para as safras de 2000/2001 a 2012/2013.

Na representação inicial que abarcava o preço do etanol anidro como variável explicativa, a elasticidade preço da oferta do etanol hidratado alcançou 1,35, significante apenas a 23%. Eliminada aquela variável, tal elasticidade atingiu 0,75, tornando-se estatisticamente significante a 5% e com um intervalo de confiança entre 0,01 e 1,49.

Na medida em que este intervalo contém 1,35 – a citada elasticidade oriunda do modelo inicial, que incluía o preço do etanol anidro como elemento exógeno - sugere-se para uma possível validade inclusive de tal elasticidade de 1,35.

No cenário mundial, Rask (1998) encontrou uma elasticidade significativa, positiva e inelástica de 0,75 para a produção de etanol nos Estados Unidos entre 1984 e 1993. Na pesquisa de Luchansky e Monks (2009) para o período de 1997 a 2006, o indicador totalizou 0,2.

Por fim, é oportuno atentar para a heterogeneidade da resposta da produção às oscilações do preço, tanto para o etanol quanto para o açúcar. Esta diversidade era esperada, pois as estimativas tendem a mudar segundo a estratégia de estimação, a especificação do modelo e período da análise.

Este último aspecto fica evidente quando da avaliação da elasticidade preço da oferta do açúcar no Brasil, sumarizadas na Tabela 4. Ainda que todos os estudos apontem para a inelasticidade da produção, enquanto alguns consideram a fase de intensa regulamentação setorial, outros contemplam períodos em que os instrumentos de controle estatal inexistiam.

¹⁵ São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Pernambuco.

Logo, qualquer extrapolação dos resultados entre esses cenários exige máxima cautela. Idêntica consideração cabe ao confrontar as elasticidades obtidas para a Europa e para o Brasil: a fabricação de açúcar no continente utiliza como matéria-prima a beterraba e, conseqüentemente, apresenta uma dinâmica distinta do sistema produtivo brasileiro.

Tabela 4. Elasticidade preço da oferta do açúcar calculada por diferentes fontes.

Autor	Elasticidade	Período	Local
Barros (1975)	0,25 ^{CP} 3,94 ^{LP}	1947-1973	Brasil
Arend (2001)	0,33 ^{CP} 0,98 ^{LP}	1969-1998	Brasil
Caruso (2002)	1,89 4,23 ^{ME}	1995-2000	Estado de São Paulo
Shikida et. al. (2009)	0,73 0,37 ^{ME}	1981-2006	Estado do Paraná
Schmitz (2018)	0,25 0,15	2008-2014	Estados Unidos México
Lopez (1989)	0,23 ^{CP} 0,48 ^{LP}	1955-1985	Estados Unidos
Devadoss e Kropf (1996)	0,215-0,228 0,085	1970-1992	União Europeia Brasil
Gohin e Bureau (2006)	0,23	1981-2004	Países Baixos, Reino Unido, Bélgica, França, Alemanha, Espanha, Itália

Fonte: elaborado pelo autor. Nota: CP – curto prazo; LP – longo prazo; ME – mercado externo.

2.6 Modelos de referência

Como consequência da análise proposta no presente estudo, recorreu-se aos modelos teóricos desenvolvidos por Drabik *et al.* (2014) e Campos (2010), adaptando-os à estruturação de um novo modelo oportunamente especificado no terceiro capítulo. Logo, este novo modelo figura como uma versão adaptada de ambas as representações, decisivas na busca e na seleção das variáveis a serem incluídas, além de racionalizarem as interações entre os mercados a serem obrigatoriamente consideradas frente ao objetivo principal desta pesquisa: capturar os reais determinantes da alocação da cana-de-açúcar entre seus dois derivados.

Drabik *et al.* (2014) partem de uma usina fabricante de açúcar (*S*), etanol anidro (*A*) e etanol hidratado (*H*) a partir da cana-de-açúcar (*SC*), atuando em um ambiente competitivo.

Para cada um desses três produtos i , os autores assumem retornos de escala constantes, custos invariáveis (ξ_i , excluindo o custo da matéria-prima e da eletricidade¹⁶) e lucros marginais nulos em equilíbrio:

$$P_{SC} = \phi_S P_S + \delta_H P_H + \delta_A P_A + \psi_S - \phi_S \xi_S \quad (1)$$

$$P_{SC} = \phi_H P_H + \psi_H - \phi_H \xi_H \quad (2)$$

$$P_{SC} = \phi_A P_A + \psi_A - \phi_A \xi_A \quad (3)$$

Nas equações (1) a (3), P_i refere-se ao preço de mercado do bem i ; ψ_i ao lucro por tonelada derivado da venda à rede do excedente de bioeletricidade, gerada no processo produtivo de i ; ϕ_i ao rendimento industrial por tonelada métrica de matéria-prima processada; ξ_i ao custo de produção de i ; e δ_i aos litros de etanol (anidro e hidratado) fabricados a partir do melaço. Este último parâmetro aborda, de forma apropriada, o atributo particular do sistema produtivo brasileiro descrito previamente: a possibilidade de usar o mel residual (da produção de açúcar) para fabricar o biocombustível, além do caldo resultante da moagem (Dias *et al.*, 2015).

Em seguida, os pesquisadores reformulam as equações (2) e (3), obtendo aquela de número (4). Esta condiciona o hiato entre os preços dos renováveis aos seus custos produtivos e ao valor da cana-de-açúcar (P_{SC}), em uma associação crescente. Ademais, a nova relação (4) respeita a prerrogativa de que o custo de se produzir etanol anidro é superior àquele incorrido para o hidratado (ou seja, segundo os parâmetros de produtividade $\phi_A < \phi_H$).

$$P_A - P_H = \xi_A - \xi_H - \left(\frac{\psi_A}{\phi_A} - \frac{\psi_H}{\phi_H} \right) + \left(\frac{1}{\phi_A} - \frac{1}{\phi_H} \right) \times P_{SC} = \beta_0 + \beta_1 \times P_{SC} \quad (4)$$

Abordando estritamente o segmento dos biocombustíveis, Drabik *et al.* (2014) desenvolvem duas expressões para a precificação do etanol anidro e do etanol hidratado (E100).

$$P_F = \alpha(P_A + t_A) + (1 - \alpha) \times (P_G + t_G) + m_F \quad (5)$$

$$P_{E100} = P_H + t_H + m_{E100} \quad (6)$$

¹⁶ Todas as usinas brasileiras são autossuficientes em energia, gerada a partir da queima do bagaço.

No que tange ao aditivo, o seu preço (P_A) com impostos (t_A), somado ao preço da gasolina (P_G suposto exógeno e também acrescido de imposto - t_G) e ao *mark-up* dos agentes distribuidores (m_F), totalizam o valor pago pelo consumidor pelo combustível fóssil (P_F). Cada componente (exceto m_F , presumido constante) é ponderado por α : o percentual obrigatório de adição de etanol anidro à gasolina.

Similarmente, o preço de bomba do etanol hidratado (P_{E100}) é igual à soma daquele recebido pelo produtor (P_H), imposto (t_H) e o *mark-up* (m_{E100}) do distribuidor.

Fixadas as seis relações anteriores, Drabik *et al.* (2014) estabelecem o equilíbrio do mercado de cana-de-açúcar, dado pela igualdade entre a sua oferta (S_{SC}) e demanda. Este último componente deriva da soma das quantidades da matéria-prima destinadas à fabricação de cada produto i , ou seja: de açúcar (C_{SC}^S); de etanol hidratado carburante (D_H) e para fim industrial (I_H , exógeno); e de etanol anidro, tanto combustível (αD_F) quanto exportado (D_A^{ROW}).

$$S_{SC}(P_{SC}) = C_{SC}^S + \frac{D_H + I_H}{\phi_H} - \frac{\delta_H C_{SC}^S}{\phi_H} + \frac{\alpha D_F + D_A^{ROW}(P_A)}{\phi_A} - \frac{\delta_A C_{SC}^S}{\phi_A} \quad (7)$$

Especificamente, o termo D_A^{ROW} retrata a exportação de etanol anidro, dada pela curva de importação mundial do produto brasileiro em função do seu preço (P_A). Por sua vez, αD_F representa o consumo doméstico do aditivo - sendo α a mistura obrigatória e D_F , a demanda de gasolina C (E25¹⁷).

Da somatória que caracteriza a demanda por cana-de-açúcar - elementos à direta da equação (7) - os autores descontam os volumes de melaço convertidos em etanol, pois, caso contrário, implicaria dupla contagem.

Drabik *et al.* (2014) concluem o modelo equalizando as demandas doméstica e externa de açúcar (D_S^D e D_S^W , respectivamente) à sua produção ($\phi_S C_{SC}^S$).

$$D_S^D(P_S) + D_S^W(P_S) = \phi_S C_{SC}^S \quad (8)$$

Adicionalmente, mencionam a possibilidade de ampliar tal modelo ao incorporar equações de consumo por gasolina C (D_F) e por etanol hidratado carburante (D_H).

¹⁷Mistura de 25% de etanol anidro e 75% de gasolina pura, também designada por gasolina tipo A. Hoje, o percentual obrigatório de adição é de 27% de etanol anidro à gasolina, conforme determinado pela Portaria nº 75 de 5 de março de 2015 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

$$D_F = f(P_F) - X(\theta) \quad (9)$$

$$D_H = g(P_{E100}) + X(\theta) \quad (10)$$

Compõe cada uma das supracitadas equações, uma função de demanda Marshalliana: $f(P_F)$ e $g(P_{E100})$, tal que $f' = \frac{df}{dP_F} < 0$ e $g' = \frac{dg}{dP_{E100}} < 0$, respectivamente. Ambas estão sujeitas a choques endógenos, com magnitude referenciada por $X(\theta)$, onde θ é o *gap* de preços dos combustíveis ($\theta = P_F - P_{E100}$).

Com o intuito de melhor retratar o racional do modelo econômico proposto, os autores o aplicam às safras 2010/2011 e 2011/2012. Isso porque, nesse período, o valor da gasolina ao consumidor brasileiro aumentou 8%, enquanto os preços do açúcar, do etanol e da cana-de-açúcar cresceram mais de 20%.

No painel superior da Figura 13, a curva de oferta de cana-de-açúcar (S_{SC}) define a condição inicial (ciclo 2010/2011), dada pela respectiva combinação preço-quantidade P_{SC} - Q_{SC} .

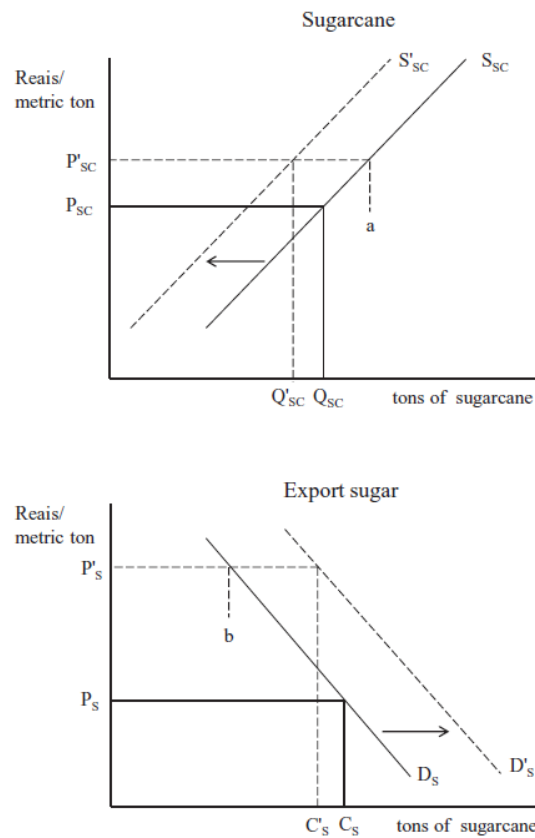


Figura 14. Deslocamentos estimados na oferta de cana-de-açúcar e na demanda de açúcar.

Fonte: Drabik et. al., 2014, p. 1438.

Como já mencionado, no período subsequente (2011/2012), o valor da matéria-prima aumentou para P'_{SC} , enquanto a moagem caiu para Q'_{SC} . Este movimento é dado pelo deslocamento paralelo à esquerda da curva de oferta de matéria-prima para S'_{SC} , em magnitude igual à distância aQ'_{SC} e calculado através da subtração $S_{SC}(P'_{SC}) - Q'_{SC}$. O primeiro elemento dessa diferença reflete qual seria a oferta de cana-de-açúcar sob a hipótese de elevação do seu preço para P'_{SC} ao longo da curva original S_{SC} .

Entretanto, esta mesma dinâmica não é necessariamente aplicável às mudanças na demanda doméstica por etanol, por açúcar ou nos fluxos internacionais dessas *commodities*. No painel inferior da Figura 14, uma queda na exportação brasileira do açúcar (de C_S para C'_S) simultânea ao aumento do seu preço (de P_S para P'_S) não permitem concluir de antemão tratar-se de um movimento à esquerda da curva D_S (relativa à procura internacional pela *commodity* brasileira).

Caso o novo preço P'_S , superior a P_S , esteja abaixo do patamar dado pela intersecção entre a curva D_S com a linha tracejada vertical C'_S , a nova curva D'_S estaria à esquerda da original D_S . No entanto, os dados revelam o contrário: D_S deslocou-se para a direita, em uma distância dada por $C'_S - D_S(P'_S)$.

Os autores ratificam esse movimento, lembrando que a direção e estimativa dependem das elasticidades. Em um panorama inicial, a partir das elasticidades centrais, verificam que entre os ciclos 2010/2011 e 2011/2012, o consumo doméstico de açúcar caiu 2,2%, enquanto a sua quantidade exportada aumentou 3,4%. Mudanças mais significativas foram observadas para a exportação de etanol (recoo de 44%), bem como para a demanda nacional de etanol hidratado (queda de 24%).

Além do modelo de Drabik *et al.* (2014) ora apresentado, aquele construído por Campos (2010) a partir dos conceitos desenvolvidos por Barros (2009), também fundamenta a estruturação do modelo do presente estudo.

A autora parte de uma função lucro para uma usina i (π_i).

$$\pi_i = PAC \times AC_i + PET \times ET_i - cCAN_i - \beta AC_i - \gamma ET_i \quad (11)$$

AC_i e ET_i são as produções de açúcar e de etanol pela unidade i ; β e γ , os respectivos custos unitários de processamento (supostos fixos e iguais para todas as usinas). Por sua vez, CAN_i corresponde ao volume processado de matéria-prima por i , atrelada ao seu custo médio c dado por C/CAN (isto é, crescente no intervalo relevante). PAC e PET são os preços do açúcar

e do etanol, com o primeiro fixado no mercado internacional e *PET* dependente da oferta doméstica.

Esta forma de precificação pressupõe que todas as usinas figuram como tomadoras de preços, com o açúcar majoritariamente exportado e todo o volume do renovável consumido internamente. Não há formação de estoques para ambos os produtos.

Como por hipótese do modelo todas as i unidades que compõem a cadeia sucroenergética apresentam coeficientes fixos e idênticos, a soma sucessiva da função lucro (11) totaliza o ganho agregado do setor.

$$\begin{aligned}\pi &= \sum_{i=1}^N \pi_i \\ &= \left(\sum_{i=1}^N PAC \times \sum_{i=1}^N AC_i \right) + \left(PET \times \sum_{i=1}^N ET_i \right) - c \sum_{i=1}^N CAN_i - \beta \sum_{i=1}^N AC_i - \gamma \sum_{i=1}^N ET_i\end{aligned}\quad (12)$$

Simplificando a relação (12), obtém-se a seguinte expressão determinante do lucro:

$$\pi = PAC \times AC + PET \times ET - cCAN - \beta AC - \gamma ET \quad (13)$$

Na etapa seguinte, Campos (2010) define as funções de produção para o açúcar e o etanol, com λ e θ como respectivos coeficientes técnicos. Estes representam a taxa de conversão dos produtos em ATR. Segundo o CONSECANA-SP, na média do Estado de São Paulo, totalizam hoje 0,95 (λ) para o açúcar e 0,60 (θ) para o etanol¹⁸.

$$AC = \lambda CAN_{AC} \quad (14)$$

$$ET = \theta CAN_{ET} \quad (15)$$

Baseado nesses coeficientes, a autora estabelece a função de transformação para os volumes da matéria-prima direcionados à fabricação do alimento (CAN_{AC}) e do renovável (CAN_{ET}), inclusive a ilustrando graficamente (Figura 15).

$$CAN = CAN_{AC} + CAN_{ET} = \frac{1}{\lambda} AC + \frac{1}{\theta} ET \quad (16)$$

¹⁸ Para obter 1 litro de etanol necessita-se de 1,6761 kg de ATR de cana-de-açúcar; analogamente, 1 kg de ATR produz 0,59 litro de etanol hidratado, considerando rendimentos médios de fermentação e destilação (Manual de Instruções, Consecana-SP, 6ª edição). Para fabricar 1 kg de açúcar VHP (*Very High Polarization*) é necessário 1,0453 kg de ATR; logo, 1 kg de ATR gera 0,95 kg de açúcar bruto.

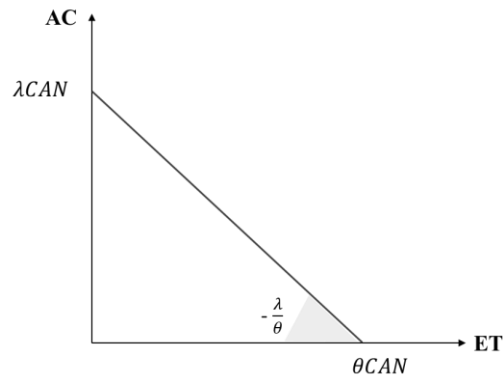


Figura 15. Curva de transformação entre açúcar e etanol

Fonte: Barros (2009) apud Campos (2010).

Na Figura 15, os eixos da abscissa e da ordenada representam as quantidades de ATR do insumo convertidas em etanol (ET) e em açúcar (AC), respectivamente. Já a inclinação da curva corresponde à taxa de transformação do adoçante em biocombustível ($-\lambda/\theta$).

Na etapa subsequente, a pesquisadora reescreve a expressão simplificada do lucro (13) em termos da equação (16), maximizando-a para obter ϕ , a relação ótima dos preços internos entre açúcar e o etanol.

$$\pi = PAC \times AC + PET \times ET - c \left(\frac{1}{\lambda} AC + \frac{1}{\theta} ET \right) - \beta AC - \gamma ET \quad (17)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial AC} = PAC - \left(\frac{c}{\lambda} + \beta \right) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial ET} = PET - \left(\frac{c}{\theta} + \gamma \right) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{PAC}{PEC} = \frac{\theta(c + \lambda\beta)}{\lambda(c + \theta\gamma)} = \phi \quad (20)$$

Oportuno salientar a consistência intrínseca à equação (20). Como todos os parâmetros nela relacionados são superiores a zero, verifica-se de fato a relação direta entre PAC e PEC , representada por uma reta com inclinação positiva igual a ϕ (Figura 16). Adicionalmente, como por hipótese λ e θ são constantes, tal relação depende dos custos unitários de processamento de ambas as *commodities*.

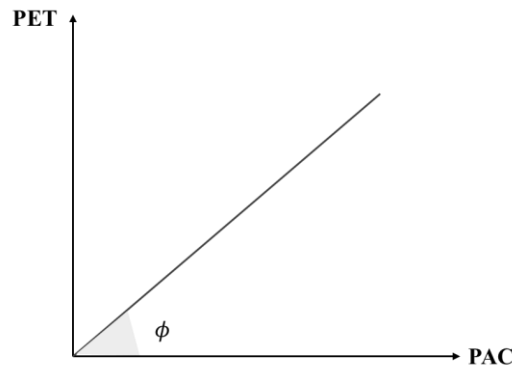


Figura 16. Relação ótima de preços entre açúcar e etanol no mercado interno.

Fonte: Barros (2009) apud Campos (2010). Nota: elaborado pelo autor.

Como ϕ envolve PAC e a precificação do açúcar ocorre no mercado externo, é preciso converter PAC^* (cotação internacional em US\$) pela taxa de câmbio (t_c , R\$/US\$) para obter o valor em moeda nacional (PAC).

$$PAC \equiv t_c \times PAC^* \quad (21)$$

Por fim, a última consideração da autora trata da moagem anual (CAN_t). Esta é determinada a partir da valoração da matéria-prima esperada em $t-1$ para o período t (P_t^e), além de contar com uma fração α cultivada que independe das expectativas de preços.

$$CAN_t = \alpha + \eta P_t^e \quad (22)$$

O elemento P_t^e - qual seja, o preço da unidade de ATR em t , projetado em $t-1$ - corresponde a uma média dos valores registrados no passado ponderados por pesos (ρ) que decrescem ao longo do tempo e .

$$P_t^e = \sum_{j=0}^T \rho(1 - \rho)^j P_{t-j-1} \quad (23)$$

Em qualquer safra, o valor da cana-de-açúcar corresponde ao preço dos seus subprodutos excluindo os custos de processamento.

$$P_t = PAC \times AC + PET \times ET - \beta AC - \gamma ET \quad (24)$$

Das expressões (22) a (24) derivam a expectativa de lucro com o cultivo da matéria-prima (25); e sua maximização (26) resulta na igualdade entre P_t^e e $c'(\partial C/\partial CAN$, ou seja, o custo marginal da produção de cana-de-açúcar).

$$\pi_t^e = E_{t-1}\pi_t = (P_t^e - c)CAN_t \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_t^e}{\partial CAN_t} &= P_t^e - c - \frac{\partial\left(\frac{c}{CAN}\right)}{\partial CAN} CAN_t = P_t^e - c - \frac{\frac{\partial c}{\partial CAN} CAN - c}{CAN^2} CAN_t \\ &= P_t^e - c - c' + c = P_t^e - c' = 0 \rightarrow P_t^e = c' \end{aligned} \quad (26)$$

Portanto, visando maximizar o lucro, a moagem em t é aquela para a qual o valor esperado da cana-de-açúcar (também em t) é igual ao seu custo marginal. Mais ainda, considerando todas as relações paramétricas supracitadas, conclui-se que a alocação de ATR entre etanol e açúcar depende dos preços e custos relativos dessas *commodities*.

Campos (2010) também apresenta graficamente tal conclusão (Figura 17). Uma vez determinado CAN para t e diante de um preço do açúcar PAC_0 estabelecido internacionalmente (e, portanto, de forma exógena), projeta-se aquele praticado para o etanol na reta de relação de preços (2º quadrante), fixando-o em PET_0 . A partir deste valor e da curva de demanda doméstica pelo renovável (1º quadrante), calcula-se o volume necessário do biocombustível (ET_0) para que este preço relativo PAC_0/PET_0 seja observado. Finalmente, transferindo esse volume à curva de transformação (4º quadrante) resulta a produção de açúcar (AC_0).

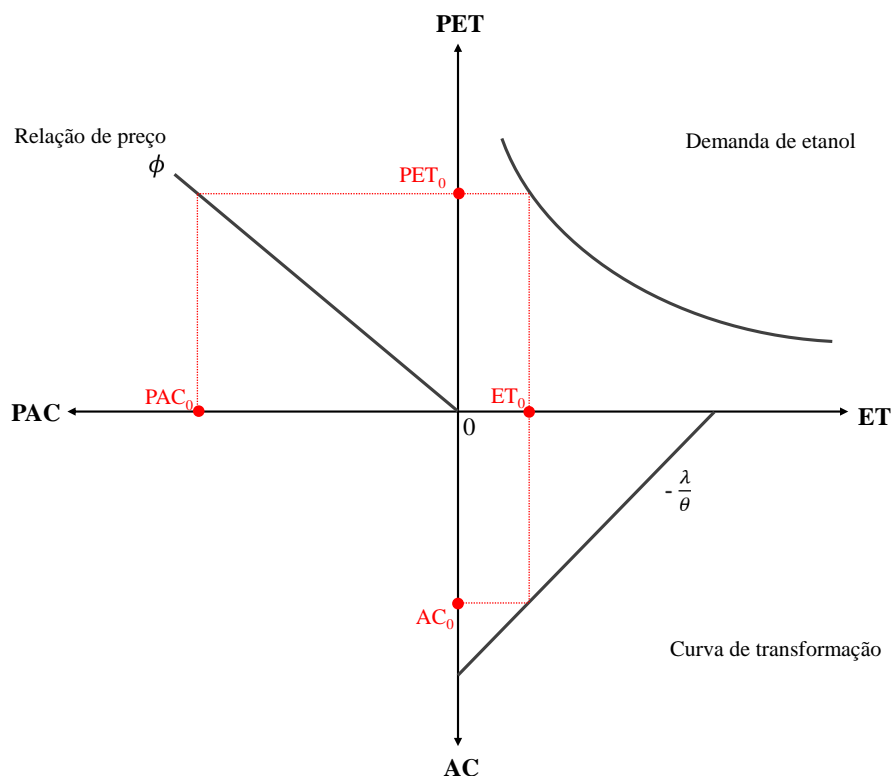


Figura 17. Determinação das proporções de açúcar e de etanol dada a produção de cana.

Fonte: Barros (2009) apud Campos (2010).

Em uma segunda análise, a autora acrescenta fundamentos próprios do mercado de açúcar (Figura 18). Mesmo assim, o racional permanece o mesmo: como o etanol e o açúcar seguem competindo entre si no processo produtivo (mix), um eventual aumento da quantidade fabricada de um deles implica em simultâneo recuo da produção do outro, *ceteris paribus*.

Dado certo *CAN* estimado para t e determinado PAC_0 - o preço da *commodity* no mercado brasileiro derivado da sua cotação internacional convertida em R\$ pelo câmbio corrente (equação 21) – obtém-se o valor PET_0 e a respectiva oferta de etanol ET_0 (2º quadrante). Imputando esse volume à curva de transformação (4º quadrante), a quantidade fabricada de açúcar totaliza AC_0 . Por sua vez, a partir da transposição dessa quantidade à curva de demanda doméstica recém-incorporada (3º quadrante) resulta o valor da produção direcionado ao abastecimento interno (área delimitada pelos pontos PAC_0 -0-B-C) e aquele voltado à exportação (área B-C-D- AC_0).

Caso o preço do açúcar diminua de PAC_0 para PAC_1 , aquele praticado para o etanol reduz para PET_1 (da relação ótima de preços no 2º quadrante). Logo, a demanda pelo biocombustível cresce para ET_1 (da sua curva de demanda no 1º quadrante) e, consequentemente, a sua produção. Como a moagem predita para t permanece em *CAN*, este

crescimento da oferta do renovável exige mais ATR, implicando na simultânea retração da quantidade produzida de açúcar para AC_1 (da sua curva de demanda doméstica no 4º quadrante). Mas, nesse cenário, não resta excedente exportável e toda a produção do adoçante destina-se ao mercado interno com faturamento fixado por PAC_1-0-AC_1-E .

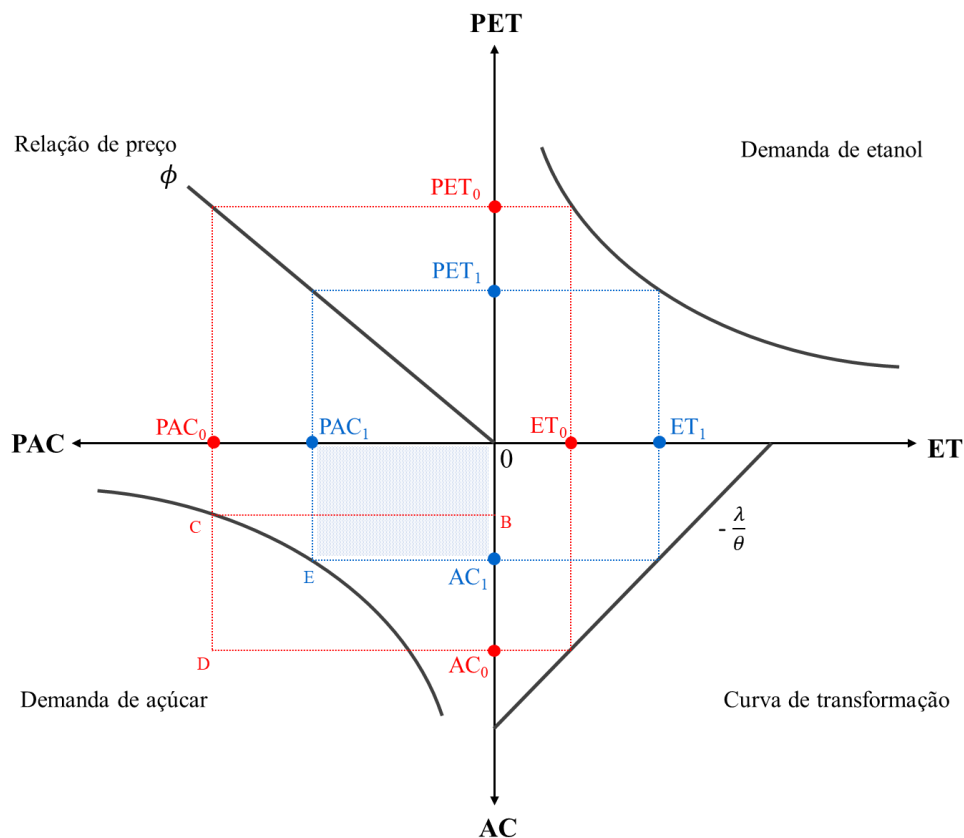


Figura 18. Determinação dos volumes de açúcar exportado e consumido internamente.

Fonte: Barros (2009) apud Campos (2010).

3 METODOLOGIA

3.1 Especificação do modelo

O modelo econômico proposto para investigar os determinantes da decisão quanto à alocação da cana-de-açúcar para a fabricação de açúcar ou etanol (definição do mix de produção) fundamenta-se, especialmente, no arcabouço teórico desenvolvido por Drabik *et al.* (2014) e por Campos (2010), descritos em revisão bibliográfica.

Assim, o primeiro modelo empírico a ser estimado, denotado por modelo A1, é dado por:

$$Ka = f(Pe, Pa, Ce, Ca, Q, A, D) \quad \text{Modelo A1 (27)}$$

com $\frac{\partial Ka}{\partial Pe} < 0; \frac{\partial Ka}{\partial Pa} > 0; \frac{\partial Ka}{\partial Ce} < 0; \frac{\partial Ka}{\partial Ca} > 0; \frac{\partial Ka}{\partial Q} > 0; \frac{\partial Ka}{\partial A} > 0; \frac{\partial Ka}{\partial D} < 0$

Em que: a variável dependente Ka denota a quantidade de açúcar (em kg) produzida por tonelada de cana-de-açúcar processada; Pe e Pa , os respectivos preços do etanol e do açúcar recebidos pela usina; Ce e Ca , as capacidades de produção de etanol e de açúcar em cada planta industrial, respectivamente; Q , a qualidade da matéria-prima processada, mensurada em kg de ATR por tonelada de cana-de-açúcar; A , o aproveitamento de moagem, medido em percentagem de dias de safra em operação; e D , a quantidade de dias de operação da usina em cada ciclo agrícola.

No caso da oferta de etanol por tonelada de cana-de-açúcar, a única mudança na especificação do modelo empírico refere-se à substituição do regressando, o qual passa a ser dado pelo volume do renovável produzido (em litros) por tonelada de matéria-prima moída (Le). Logo, as variáveis explicativas no modelo A2 seguem inalteradas, conforme a função a seguir:

$$Le = f(Pe, Pa, Ce, Ca, Q, A, D) \quad \text{Modelo A2 (28)}$$

com $\frac{\partial Le}{\partial Pe} > 0; \frac{\partial Le}{\partial Pa} < 0; \frac{\partial Le}{\partial Ce} > 0; \frac{\partial Le}{\partial Ca} < 0; \frac{\partial Le}{\partial Q} > 0; \frac{\partial Le}{\partial A} < 0; \frac{\partial Le}{\partial D} > 0$

Adicionalmente a essa especificação, doravante modelo A, optou-se por estimar uma segunda estrutura cuja variável dependente corresponde ao próprio mix de produção da

unidade industrial, tal como em Lamounier, Campos Filho e Bressan (2006). Esse indicador retrata a proporção de cana-de-açúcar alocada à fabricação de açúcar (*mixa*) e de etanol (*mixe*). Dessa forma, a representação empírica do modelo B é:

$$mixa = f(Prel, Ce, Ca, A, D) \quad \text{Modelo B1 (29)}$$

$$\text{com } \frac{\partial mixa}{\partial Prel} < 0; \frac{\partial mixa}{\partial Ce} < 0; \frac{\partial mixa}{\partial Ca} > 0; \frac{\partial mixa}{\partial A} > 0; \frac{\partial Prel}{\partial D} < 0$$

$$mixe = f(Prel, Ce, Ca, A, D) \quad \text{Modelo B2 (30)}$$

$$\text{com } \frac{\partial mixe}{\partial Prel} > 0; \frac{\partial mixe}{\partial Ce} > 0; \frac{\partial mixe}{\partial Ca} < 0; \frac{\partial mixe}{\partial A} < 0; \frac{\partial Prel}{\partial D} > 0$$

A diferença entre ambos os modelos A e B se refere exclusivamente à supressão de Q (qualidade da matéria-prima) na segunda especificação, pois seu regressando (*mix*) já incorpora este parâmetro por tratar-se de uma proporção. Nesse caso, os preços do etanol e do açúcar também foram contemplados em termos relativos, com $Prel = Pe/Pa$.

De fato, conforme exposto na revisão de literatura, todos os estudos voltados a estimar as ofertas de açúcar e de etanol incorporam os preços desses produtos. Já a seleção das demais variáveis exógenas estabelecidas no modelo empírico baseou-se na disponibilidade de dados e, especialmente, no entendimento da dinâmica produtiva junto aos agentes privados.

Cabe mencionar ainda que a lógica adotada, bem como a estrutura dos dados utilizados, elimina eventuais problemas de endogeneidade em relação aos preços do produto. Isso porque, uma unidade individualmente possui ação limitada sobre os preços de mercado em vista da pulverização setorial.

Em síntese, a intenção é validar os resultados obtidos por ambos os modelos empíricos apresentados reciprocamente; e, desta forma, ratificar a análise de sensibilidade conduzida sobre os impactos de cada covariável na decisão alocativa da cana-de-açúcar entre a produção de etanol e de açúcar.

Portanto, apesar de tornar a apresentação dos resultados mais intrincada, a opção por estimar mais de um modelo garante maior robustez e segurança acerca dos resultados gerados.

3.2 Procedimento econométrico

Como mencionado em revisão bibliográfica, há uma clara predominância de séries de tempo em estudos sobre o *trade-off* na produção de açúcar e etanol, frequentemente motivados pela disponibilidade de longas séries de preços dessas *commodities*.

Diferentemente, a presente pesquisa contempla dados em painel: todas as suas variáveis são próprias de uma unidade produtora i na safra t , com essas mesmas N usinas i acompanhadas ao longo de T períodos.

O emprego de técnicas que explorem ambas as dimensões temporal e espacial dos dados confere vantagens à estimação dos modelos longitudinais como aqueles ora propostos, redundando em maior potência das estatísticas de teste e em estimadores mais eficientes (WOOLDRIDGE, 2016; FÁVERO; BELFIORE, 2017). Além de ampliar a amostra, o número de graus de liberdade e a variabilidade dos dados (mitigando eventual colinearidade), essas técnicas permitem o controle pela heterogeneidade não observável das unidades individuais.

Por heterogeneidade não observável entendem-se todos os fatores não observados (e, por isso, não incorporados à regressão como as variáveis explicativas), mas que afetam o regressando. Omiti-los implica em um risco potencial de resultados tendenciosos.

No contexto desta pesquisa, a cultura empresarial, as condições de solo e clima, os ganhos agregados de produtividade e a influência da história do Estado sobre suas atividades agropecuárias são alguns exemplos de fatores não observados que podem impactar o mix produtivo (a variável dependente).

Em vista desses benefícios, recorreu-se a três métodos de estimação das representações A e B: a regressão com dados empilhados (*pooled regression*), o modelo de Efeito Fixo (EF) e o modelo de Efeito Aleatório (EA).

3.2.1 Regressão com dados empilhados

Denominado POLS (*Pooled Ordinary Least Square*), essa técnica agrega todos os registros, considerando a base de dados como uma grande *cross-section*. Essa estratégia possibilita estimar uma regressão agrupada (*pooled*) via MQO de forma consistente e eficiente.

Sua representação é:

$$Y_{it} = \beta_k X_{kit} + \varepsilon_{it} \quad i=1, \dots, N \text{ e } t=1, \dots, T \quad (31)$$

O subscrito i corresponde à unidade de corte transversal (cada uma das usinas analisadas, somando N unidades da amostra) e t à safra para as quais se coletaram as observações (totalizando T ciclos avaliados); logo, a variável X_{it} denota o dado da variável explicativa X para a unidade i no instante de tempo t . A mesma interpretação aplica-se à variável dependente Y_{it} , que representa o fenômeno em estudo. O elemento β_k refere-se ao coeficiente angular da k -ésima covariável; e ε_{it} , ao termo de erro para i -ésima unidade em t .

Trata-se de um modelo clássico de regressão linear que despreza a natureza temporal e de corte transversal das observações, e que, portanto, assume todos os parâmetros como fixos entre os diferentes i e t . Pressupõe ainda ε_{it} como independente e identicamente distribuído (IDD) com média zero e variância constante – $\varepsilon_{it} \sim IID(0, \sigma_\varepsilon^2)$ – para obtenção de estimadores não tendenciosos (WOOLDRIDGE, 2016).

3.2.2 Modelo de Efeito Fixo

A abordagem de EF “[...] considera a existência de efeitos individuais a_i que representam as heterogeneidades entre os indivíduos e capturam as suas diferenças invariantes no tempo, ou seja, as diferenças nos interceptos (não nas inclinações).” (FÁVERO; BELFIORE, 2017, p. 797). Em outros termos, assume que cada unidade i tem as suas próprias características, o que implica na presença de um intercepto distinto, mas fixo no tempo, para cada uma dessas unidades.

A incorporação desse atributo à regressão com dados em painel exige a decomposição do termo de erro ε_{it} em dois elementos¹⁹, a_i e u_{it} tal que:

$$\varepsilon_{it} = a_i + u_{it} \quad (32)$$

Denominado de erro idiosincrático ou erro de variação temporal, u_{it} representa os fatores não observados que impactam Y_{it} e variam ao longo do tempo. Já a_i (conhecido como efeito fixo ou efeito não observado) refere-se à supracitada heterogeneidade não observável e

¹⁹ Além desses componentes, há um terceiro: λ_i , a heterogeneidade não observável no tempo. Também chamado de componente *within* (assim como a_i), este não é abordado quando da apresentação da teoria introdutória sobre análise econométrica de dados em painel. Nesse estágio do aprendizado, a literatura pertinente ao tema comumente refere-se somente a a_i .

contempla os fatores não observados, que afetam Y_{it} , mas que são invariantes no tempo. Logo, quando da estimação, é tomado como um parâmetro fixo a ser estimado.

A junção do modelo (31) com a expressão (32) resulta em:

$$Y_{it} = a_i + \beta_k X_{kit} + u_{it} \quad i=1, \dots, N \text{ e } t=1, \dots, T \quad (33)$$

$$u_{it} \sim IID(0, \sigma_u^2), \text{cov}(X_{it}, u_{it}) = 0$$

Considerando a representação (33), o método de EF busca remover o impacto de a_i para que se possa avaliar o efeito líquido dos preditores sobre a variável resultado. Para tanto, utiliza uma transformação *within* (também identificada por transformação intragrupo ou de efeito fixo), aplicando a diferenciação de médias.

Para cada i , deve-se calcular a média de cada variável ($\bar{Y}_i = T^{-1} \sum_{t=1}^T Y_{it}$, por exemplo) e após, o seu desvio em relação a este valor médio.

$$Y_{it} - \bar{Y}_i = (\beta_0 - \beta_0) + \beta_k(X_{it} - \bar{X}_i) + (a_i - a_i) + (u_{it} - \bar{u}_i) \quad (34)$$

Dessa centralização das observações em torno da média, resulta a eliminação de a_i , o que permite, enfim, aplicar MQO à expressão (34) para obter estimadores consistentes de β_k .

Nesse sentido, é possível vislumbrar a_i como o efeito das variáveis omitidas do modelo controlada por meio de uma transformação interna. Porém, tal transformação (centralização na média) elimina da análise qualquer outro elemento que esteja fixo: $\ddot{x}_{it} = 0$ para todo i e t , se x_{it} é constante ao longo de t . Assim, o parâmetro de uma variável sem oscilação em seus dados (sem variação *within*) não é sequer identificado.

A despeito dessa dificuldade, o estimador de EF apresenta uma propriedade crucial: admite uma exogeneidade estrita das variáveis explicativas, ou seja, ele segue não viesado mesmo diante de correlação entre a heterogeneidade individual não observável a_i e X_{it} . Formalmente, significa que para cada t , é nulo o valor esperado do erro idiossincrático u_{it} , dado os regressores em todos os períodos de tempo e o efeito não observado - $E(u_{it}|X_i, a_i) = 0$ (WOOLDRIDGE, 2016).

3.2.3 Modelo de Efeito Aleatório

A similaridade conceitual entre os modelos de EF e de EA reside nas seguintes suposições: a_i difere entre as unidades individuais, mas é fixo no tempo; e β_k (os coeficientes das variáveis explicativas) é constante para todos os cortes transversais e temporais.

Já a discrepância entre ambos os métodos se refere às hipóteses feitas sobre os componentes do termo de erro a_i e u_{it} (PILLAI, 2016).

Em uma regressão de EF, (i) cada unidade de corte transversal possui seu próprio valor de intercepto, de modo que a_i é um parâmetro fixo a ser estimado, enquanto $u_{it} \sim IID(0, \sigma_u^2)$; (ii) admite-se endogeneidade limitada, ou seja, correlação entre esses interceptos a_i e os regressores X_{it} em todos os períodos de tempo.

Ao contrário, o modelo de EA assume a_i como randômico²⁰ e não correlacionado com as variáveis explicativas. Por conseguinte, a_i apresenta as mesmas propriedades do erro idiossincrático u_{it} (sem autocorrelação serial e não correlacionado com as variáveis explicativas):

$$\begin{aligned} a_i &\sim IID(0, \sigma_a^2) & u_{it} &\sim IID(0, \sigma_u^2) \\ cov(u_{it}, a_i) &= 0 & cov(u_{it}, X_{it}) &= 0 & cov(X_{it}, a_i) &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Essa ausência de correlação entre a heterogeneidade individual não observada a_i e os regressores implica em um estimador de EA consistente e eficiente, ao passo que a metodologia de EF produz estimativas consistentes, mas não eficientes. Em contrapartida, presumindo a_i como correlacionado com cada variável explicativa X_{it} , tem-se um resultado inverso: o estimador de EF torna-se consistente e (possivelmente) eficiente²¹, ante a não consistência do EA.

É imprescindível ponderar sobre esta discrepância entre ambos os métodos ao decidir quais deles usar. De acordo com Wooldridge (2016) e Fávero e Belfiore (2017), esse é o principal critério de decisão entre EF e EA.

Em outras palavras, se o pesquisador tiver alguma razão para acreditar que as diferenças que existem entre indivíduos influenciam consideravelmente o

²⁰O conjunto de i unidades sobre os quais há informações disponíveis corresponde a uma amostra aleatória de um contingente maior de indivíduos.

²¹Se $E(a_i|X_{it}) \neq 0$, o estimador de EF será eficiente caso u_{it} forem: (i) homocedásticos - $Var(u_{it}|X_{it}, a_i) = Var(u_{it}) = \sigma_u^2$ para todo $t=1, \dots, T$; e (ii) serialmente não correlacionados, condicionais a a_i e a todas as variáveis explicativas em todos os períodos - $cov(u_{it}, u_{is}|X_{it}, a_i) = 0$ para todo $t \neq s$.

comportamento da variável dependente, então já pode começar a suspeitar de que o modelo estimado por efeitos aleatórios será mais adequado do que o estimado por efeitos fixos. Por outro lado, se existirem razões para acreditar que os efeitos individuais estejam correlacionados com as variáveis explicativas, a estimação por efeitos aleatórios oferecerá parâmetros inconsistentes e o modelo por efeitos fixos será mais adequado. (FÁVERO; BELFIORE, 2017, p. 799).

A regressão por EA fundamenta-se na metodologia de Mínimos Quadrados Generalizados (MQG). Fávero e Belfiore (2017) partem da relação $\varepsilon_{it} = a_i + u_{it}$ (32) e da expressão (31) que conta, agora, com a inclusão de um intercepto para presumir que a_i possui média zero (sem perda de generalidade):

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_k X_{itk} + a_i + u_{it} \quad (36)$$

Sobre a equação (36), os autores desenvolvem a transformação linear abaixo, aplicando o parâmetro θ_i definido como $\theta_i = 1 - \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 / (T\sigma_a^2 + \sigma_\varepsilon^2)}$:

$$Y_{it} - \theta_i \bar{Y}_i = \beta_0(1 - \theta_i) + \beta_k(X_{itk} - \theta_i \bar{X}_{ik}) + a_i(1 - \theta_i) + (u_{it} - \theta_i \bar{u}_i) \quad (37)$$

Comparando (34) e (37), nota-se que a transformação envolvida no EF (34) subtrai as médias temporais da variável correspondente, ao passo que no procedimento de EA (37) desconta-se dessa média temporal apenas certa fração θ_i , definida como função de σ_ε^2 , σ_a^2 e do número de períodos de tempo T. Dessa forma, o estimador MQG torna-se um estimador de MQO agrupado sobre dados quase centrados na média, que abarca simultaneamente as variações *within* (σ_u^2) e *between* (σ_a^2) nos dados. Qualquer resto de heterogeneidade (após a inserção de controles adequados na regressão) induz a correlação serial somente em u_{it} , sem implicar em correlação entre esses erros e as variáveis explicativas.

Vale atentar ainda que a estimação de EA possibilita incorporar variáveis fixas no tempo, ao contrário do EF em que estas são eliminadas (PILLAI, 2016).

3.3 Testes de especificação do modelo

Concluída a etapa de estimação dos modelos A e B pelas três técnicas de dados em painel anteriormente detalhadas, cabe conduzir os testes: multiplicador de Lagrange (LM - *Lagrange Multiplier*) de Breusch-Pagan, Chow e Hausman. O objetivo é detectar a conveniência da utilização de uma dentre essas técnicas.

O teste LM desenvolvido por Breusch e Pagan (1980) confronta os resultados obtidos com a regressão *pooled* e por EA. Sua hipótese nula sugere variância nula entre as unidades individuais i - $H_0: \sigma_a^2 = 0$, ou seja, $cov(\varepsilon_{it}\varepsilon_{is}) = cov(a_i + u_{it}, a_i + u_{is}) = cov(u_{it}, u_{is})$ com $t \neq s$. Dessa forma, sua não rejeição indica inexistir diferenças significativas entre i e, consequentemente, não há nenhum efeito em painel: o método POLS é adequado.

Já a hipótese alternativa sinaliza para uma variância de a_i como função multiplicativa de uma ou mais variáveis ($H_a: \sigma_a^2 \neq 0$). Uma vez aceita, conclui-se que, a certo nível de significância, as diferenças entre as i unidades amostradas são estatisticamente significantes: o modelo de EA, estimado por MQG, é desejável.

No que tange à estatística do teste abaixo descrita, esta apresenta distribuição qui-quadrado com um grau de liberdade, sob H_0 .

$$LM = \frac{nT}{2(T-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T \hat{u}_{it})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \hat{u}_{it}^2} - 1 \right]^2 \sim \chi^2(1) \quad (38)$$

O teste de Chow, um teste F, consiste em verificar a presença de heterogeneidade individual não observável. A hipótese nula refere-se à constância dos interceptos para todos os i indivíduos ($H_0: a_i = 0$), o que se traduz em um modelo com uma constante e uma inclinação iguais para todo i . Nessas circunstâncias, o procedimento POLS é preferível. Porém, diante da rejeição dessa hipótese, constata-se existir a citada heterogeneidade não observada (os efeitos individuais a_i para todos os i são diferentes de zero) e, portanto, é desejável a modelagem via EF, com coeficiente de inclinação constante e intercepto distinto entre as i unidades.

Essas características permitem considerar tal modelo como irrestrito comparativamente ao POLS, vista como a regressão restrita por contar com intercepto comum a todas as unidades ($a_1 = a_2 = \dots = a$). Esse entendimento fundamenta o uso da seguinte estatística F neste teste:

$$F = \frac{(R_{EF}^2 - R_{Pols}^2)/(T-1)}{(1 - R_{EF}^2)/(nT - T - K)} \sim F(T-1, nT - T - K) \quad (39)$$

Nessa representação, R_{EF}^2 é o coeficiente de ajuste obtido pela estimação por EF (modelo irrestrito); R_{POLS}^2 , o coeficiente de determinação derivado do POLS (modelo restrito); k , o número de regressores; n , o total de indivíduos; e T , o número de anos avaliados.

A decisão entre o uso do método de EF vis-à-vis de EA demanda a aplicação do teste de Hausman. Sua hipótese nula prevê a não correlação entre a_i e X_{it} - $E(a_i|X_{it})=0$. Se não rejeitada, ambos os estimadores são consistentes, mas apenas aquele de EA é também assintoticamente eficiente. Logo, este último (EA) é o selecionado.

Em contrapartida, a rejeição dessa hipótese – análoga à aceitação da hipótese alternativa $H_A: E(a_i|X_{it}) \neq 0$ – implica inconsistência do estimador de EA $\hat{\beta}_{EA}$ ante a habitual consistência do procedimento de EF, o qual é, portanto, preferível.

Posto esse entendimento, o teste de Hausman reflete a principal discrepância entre ambas as abordagens em apreço, mencionada anteriormente: a correlação entre a_i e X_{it} . Como o método de EF prevê a vigência dessa correlação ao contrário do EA, deve-se interpretar uma diferença estatisticamente significativa como evidência contra a suposição de EA.

Pillai (2016) explica com clareza o conceito desse teste, aplicável a qualquer verificação que conte com dois estimadores, sendo um deles eficiente sob a hipótese nula, porém inconsistente na alternativa; e o outro estimador consistente sob as duas hipóteses, embora sem eficiência em nenhuma delas. Baseado nesse racional, Hausman (1978) construiu a estatística de teste abaixo, a qual possui distribuição qui-quadrado assintótica com k (número de regressores) graus de liberdade.

$$h = \hat{q}'(varq)^{-1}\hat{q} \sim \chi^2(k) \quad (40)$$

Nessa expressão, $\hat{q} = \hat{\beta}_{EA} - \hat{\beta}_{EF}$ e $Var(\hat{q}) = var(\hat{\beta}_{EA}) - var(\hat{\beta}_{EF})$, tal que sob a hipótese nula \hat{q} converge à zero (devido à consistência de ambos os estimadores), o que não ocorre sob a hipótese alternativa: $plim q = 0$ e $cov(\hat{\beta}_{EA}, \hat{q}) = 0$.

De fato, $\hat{\beta}_{EF}$ é consistente nas abordagens de EF e de EA, ou seja, sendo a hipótese nula rejeitada ou não.

Já $\hat{\beta}_{EA}$ é o melhor estimador linear não viesado (*Best Linear Unbiased Estimator* – BLUE na sigla em inglês), consistente e assintoticamente eficiente somente sob tal hipótese (ou seja, apenas se empregado em um modelo de EA). Em contrapartida, torna-se inconsistente se utilizado em uma modelagem de EF: com $T \rightarrow \infty$, consideram-se os efeitos

fixos individuais a_i como realizações de variáveis aleatórias com média zero, o que viola o pressuposto de que $E(a_i|X_{it})=0$.

3.4 Base de dados

Os dados longitudinais utilizados nesta pesquisa compreendem 119 usinas anexas (N=119), produtoras de açúcar e de etanol a partir da cana-de-açúcar, localizadas no Estado de São Paulo e em safra nos períodos de 2010/2011 até 2018/2019 (T=9), totalizando 1.071 observações. A elas associam-se indicadores técnico-econômicos com potencial influência sobre o mix de produção.

Esta amostra não contempla as destilarias e as fábricas exclusivas de açúcar - mesmo que situadas no Estado e ainda que utilizem a cana-de-açúcar como matéria-prima.

Trata-se de uma amostra altamente representativa: conta com 119 anexas, dentre 133 em atividade na temporada 2011/2012 (aquela com maior contingente dentre os ciclos analisados) no Estado de São Paulo.

Evitou-se a seleção de safras anteriores a 2010/2011, pois a série de preços do etanol utilizada (“Indicador Diário Paulínia”) inicia-se em janeiro de 2010. Pesaram ainda a menor acurácia de determinadas estatísticas nos períodos precedentes, o que poderia comprometer a robustez dos resultados.

Os procedimentos econométricos foram realizados a partir dos programas R e Stata, enquanto os microdados derivam de diversas bases públicas e privadas pormenorizadas a seguir.

3.4.1 Preço

O preço do etanol refere-se ao “Indicador Diário Paulínia”: preço do etanol hidratado carburante (R\$ por m³), levantado diariamente pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2019) para liquidação financeira do contrato do biocombustível da BM&FBovespa.

Isento de impostos, o índice abarca os negócios efetivados entre as unidades produtoras da região Centro-Sul e os compradores (especialmente distribuidoras de combustíveis), e cujos volumes destinem-se às bases de armazenamento e de distribuição no município de Paulínia e às bases de influência desse polo (Guarulhos, Barueri, Santo André,

São Caetano do Sul, São José dos Campos, Cubatão, Ipiranga e São Paulo). Logo, trata-se de valores uniformizados para a condição *Cost, Insurance and Freight* (CIF) Paulínia.

Em virtude desses atributos e dado o propósito desta pesquisa, sugere-se ajustar o indicador para que reflita, com a maior acurácia possível, o preço líquido do renovável recebido pelo produtor paulista – na terminologia do mercado, o preço na condição Posto Veículo Usina (PVU) ou Posto Veículo Destilaria (PVD). Para tanto, resta descontar do valor informado pelo CEPEA, o frete. Este último é coletado pelo Sistema de Informações de Fretes (SIFRECA) para diversas rotas no Brasil, inclusive envolvendo o transporte rodoviário de etanol a partir de diferentes cidades até Paulínia. O CEPEA também disponibiliza esta informação.

A relação abaixo elucida simplificada o procedimento para o cálculo do preço do etanol Pe utilizado neste exercício empírico.

$$Ind_{Paulínia} - Frete_{i-Paulínia} = Pe \quad (41)$$

Em que: $Ind_{Paulínia}$ é a média mensal do “Indicador Diário Paulínia” em R\$ por m³. $Frete_{i-Paulínia}$ corresponde ao valor do transporte do biocombustível via rodovia entre o município paulista onde se localiza a usina i (conforme cadastro do MAPA) até Paulínia, mensalmente apurado pelo SIFRECA e CEPEA, em R\$ por m³. Quando a rota a ser considerada não é pesquisada por essas instituições, estimou-se o frete a partir da distância entre a cidade da indústria i e Paulínia, coletada do GoogleMaps sem triangulação com a base a que efetivamente se direciona o produto.

Essa estimativa baseou-se em artigo de Branco *et al.* (2019), dedicado a identificar a localização ótima para novas usinas no Brasil. Os autores quantificaram o frete rodoviário entre cada par origem-destino usando uma regressão log-linear (método de MQO) a partir das estatísticas do SIFRECA para 2016.

$$\ln F_{ij} = \alpha + \beta \ln X_{ij} \quad (42)$$

Na relação (42), F_{ij} e X_{ij} são, respectivamente, o frete e a distância entre os nós $i-j$. Idêntica metodologia foi empregada no cômputo do frete rodoviário do açúcar entre a unidade i e o porto de Santos.

No caso dessa *commodity*, a sistemática para cômputo do preço líquido auferido pelo produtor (*Pa*) parte da cotação na Bolsa de Nova York. Lá, por meio da *Intercontinental Exchange* (ICE) *Futures*, são negociados contratos de açúcar bruto desde 1970.

Múltiplas características da atividade sucroenergética brasileira justificam o uso dessa referência internacional. Estudos citados em revisão de literatura mostram que os preços praticados no País possuem alta correlação com as cotações mundiais. Diehl (2012), por exemplo, estimou em 85% a elasticidade de transmissão de preço do mercado internacional para o doméstico (acumulada em três meses e para dados entre maio de 2001 a março de 2011).

Sob este escopo, concorre também a composição o indicador mensal de preço do açúcar cristal vendido no mercado doméstico, levantado pelo CEPEA para o CONSECANA-SP. Entre 2014 e 2018, 55% do volume amostrado para o cálculo desse indicador baseou-se em contratos que tomam como referência a cotação de Nova York.

Esta, por sua vez, abrange o açúcar tipo bruto, enquanto a *London International Financial Futures and Options Exchange* (Liffe) transaciona contrato de açúcar branco (*white sugar*), cuja representatividade sobre as exportações brasileiras é baixa. Na última década (2009 a 2018), o País exportou em média 26 milhões de toneladas da *commodity* por ano, sendo 80% na sua forma bruta (SECEX, 2019).

A Figura 19 confirma o indicador de Nova York como o balizador do preço no mercado doméstico, ao mostrar a semelhança na evolução entre ambos.

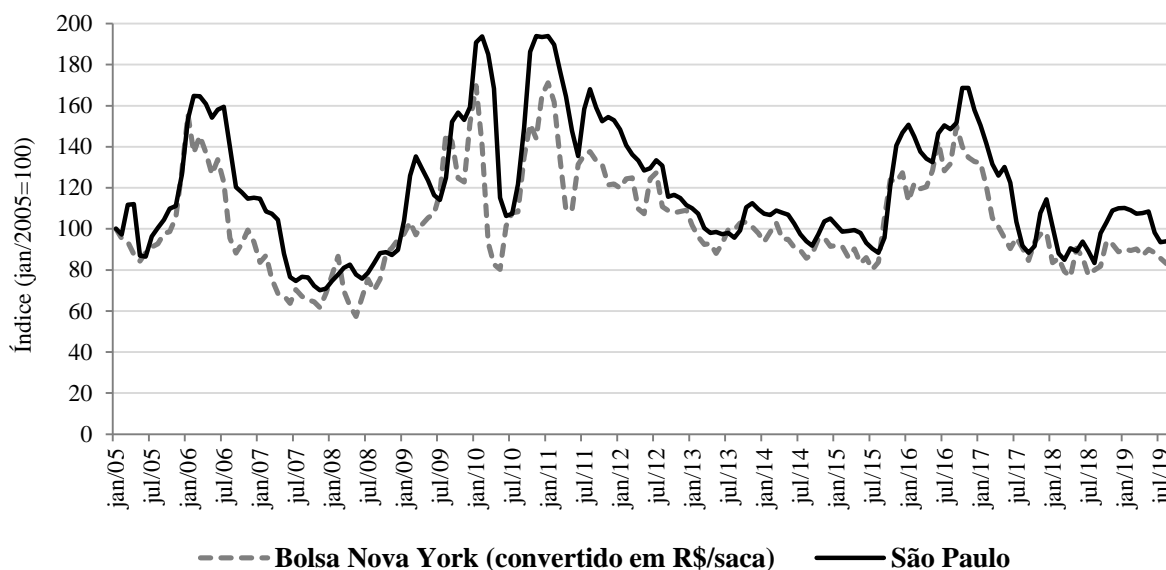


Figura 19. Preço do açúcar cristal recebido pelo produtor no Estado de São Paulo e cotação do contrato n° 11 na bolsa de Nova York (convertido em R\$ por saca). Valores registrados entre janeiro de 2005 até agosto de 2019, deflacionados pelo IPCA para agosto de 2019.

Fonte: IBGE para Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA); Banco Central para taxa de câmbio; CEPEA/ESALQ-USP para Indicador do Açúcar Cristal – São Paulo; ICE Futures para cotação do contrato n° 11. Nota: cotação internacional em cents US\$ por libra-peso transformada em R\$ por saca de 50 kg a partir do câmbio comercial de venda.

Do exposto, o cálculo do valor auferido pela usina com o comércio de açúcar (Pa) segue o racional abaixo.

$$Cotacao_{NY} + Prêmio - Elevação - Frete_{i-santos} = Pa \quad (43)$$

A variável $Cotacao_{NY}$ corresponde à cotação diária do contrato n° 11 negociado pela ICE *Futures*, em cents de US\$ por libra-peso – o que exige a conversão para R\$ por tonelada a partir da taxa de câmbio e do parâmetro pertinente²². A taxa comercial de venda (R\$ por US\$ americano) publicada diariamente pelo Banco Central do Brasil foi aquela utilizada.

A essa cotação, cabe adicionar o prêmio de polarização (*Prêmio*), fixado em 4,05% até fevereiro de 2016 e em 4,20% a partir do mês subsequente, como média para o Estado de São Paulo (CEPEA, 2019). Esse prêmio decorre da qualidade superior do açúcar brasileiro em relação às especificações da Bolsa de Nova York.

²² US\$ 1 cent por libra-peso equivale a US\$ 22,0462 por tonelada.

Em seguida, descontam-se o frete ($Frete_{i-Santos}$) e o custo de Elevação ($Elevação$), ambos em R\$ por tonelada. Este último consiste no custo incorrido para embarque da carga no navio e tem o CEPEA como fonte para série histórica de dados.

Todos os elementos supracitados que compõem Pa e Pe exigiram a conversão dos dados, originalmente diários ou mensais, à frequência por ano-safra (abril a março) mediante o cálculo das médias aritméticas simples. Em seguida, foram deflacionados a valores reais de março de 2019 (último mês da análise) pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) computado pelo IBGE; e, após, transformados em kg de ATR.

Essa transformação visa uniformizar a unidade de medida desses preços e, consequentemente, torná-los comparáveis. Para tanto, aplica-se os parâmetros técnicos correntes do CONSECANA-SP para a conversão dos produtos da cana-de-açúcar em ATR, a saber: um kg de açúcar bruto equivale a 1,0453 kg de ATR; um litro de etanol hidratado corresponde a 1,6761 kg de ATR²³ (Manual de Instruções CONSECANA-SP, 6ª edição).

Portanto, os preços do açúcar e do etanol utilizados na modelagem são aqueles recebidos pelo produtor i na safra t , livres de tributo e frete, na condição PVU e expressos em R\$ por kg de ATR. Consistem em uma referência do valor de venda da mercadoria, não correspondendo ao preço efetivamente auferido por i .

3.4.2 Indicadores operacionais

Todas as unidades industriais produtoras de açúcar e etanol, cooperativas de produção e comercialização e empresas comercializadoras de etanol em atividade no Brasil devem reportar determinadas informações ao Sistema de Acompanhamento de Produção Canavieira, o SAPCana, do MAPA (Instrução Normativa MAPA nº 52 de 12 de novembro de 2009).

Esses agentes registram neste sistema *on-line* dados bastante detalhados, com frequência quinzenal²⁴, sobre o volume processado de cana-de-açúcar, a industrialização e a comercialização de ambos os subprodutos. O Anexo A traz um exemplo do formulário utilizado na declaração desses dados.

²³ Os parâmetros do CONSECANA-SP consideram perdas industriais, eficiência de fermentação e de destilação. Por isso, um kg de ATR não equivale exatamente a um kg de açúcar obtido por meio de cristalização. O mesmo raciocínio aplica-se ao etanol.

²⁴ Os prazos correntes para envio dos informes ao SAPCana são: entre os dias 01 a 07 do mês para as informações relativas à segunda quinzena do mês anterior; entre os dias 16 a 22 para as informações relativas à primeira quinzena do mês vigente.

A UNICA, por sua vez, recebe esses informes quinzenais de todas as unidades da região Centro-Sul do País compilando-os, além de proceder à ampla checagem das informações. Tratam-se, portanto, de estatísticas exclusivas pormenorizadas por usina, por quinzena, por mercado de destino, por tipo de produto; e que abrangem desde a moagem e produção a estoques e vendas.

A partir dessa base de dados da UNICA, sujeita a estritos critérios de confidencialidade, foram calculados os regressores Ca , Ce , Q e A , bem como as variáveis dependentes dos modelos A (abaixo) e B.

$$Ka_{it} = Prod\ ac_{it}/moagem_{it} \quad (44)$$

$$Le_{it} = Prod\ et_{it}/moagem_{it} \quad (45)$$

$Prod\ ac_{it}$ e $Prod\ et_{it}$ representam, respectivamente, as produções de açúcar (em toneladas) e de etanol (em m³) pela unidade i na safra t , enquanto $moagem_{it}$, o volume processado de cana-de-açúcar (em toneladas) pela mesma usina i e no mesmo ciclo t . O indicador Ka_{it} refere-se aos quilos de açúcar fabricados por tonelada moída da matéria-prima e Le_{it} , aos litros de etanol produzidos por tonelada.

A partir desses indicadores, contabilizados para os últimos 11 anos, obteve-se uma *proxy* para as capacidades de produção do renovável (Ce_{it}) e do açúcar (Ca_{it}).

$$Ca_{i2011} = \max\{Ka_{i2009}, Ka_{i2010}, Ka_{i2011}\} \quad (46)$$

$$Ca_{it} = \max\{Ka_{it-1}, Ka_{it}\} \text{ para } t \geq 2012 \quad (47)$$

$$Le_{i2011} = \max\{Le_{i2009}, Le_{i2010}, Le_{i2011}\} \quad (48)$$

$$Le_{it} = \max\{Le_{it-1}, Le_{it}\} \text{ para } t \geq 2012 \quad (49)$$

Essa *proxy* resulta do maior Ka_{it} (Le_{it}) registrado entre 2009 e 2011, quando relativo à safra 2011/2012 (46 e 48). A partir da temporada 2012/2013 (47 e 49), corresponde ao valor máximo desse indicador apurado entre os ciclos t (aquele em análise) e $t-1$ (anterior). Adotou-se essa forma de cálculo devido à falta de estatísticas plausíveis sobre a capacidade produtiva diária das usinas e por permitir variações de Ca_{it} e Le_{it} - aspecto aderente à realidade setorial, em que a maior parte das indústrias comumente pode adaptar sua capacidade às condições de mercado e às perspectivas.

No que tange aos componentes para o cômputo dos regressandos do modelo B, estes são os mesmos usados em (44) e (45), porém ponderados pelos citados parâmetros técnicos do CONSECANA-SP para a conversão dos produtos em ATR. Essa ponderação também exigiu o detalhamento de $Prod\ et_{it}$ nos volumes produzidos de etanol hidratado ($Prod\ hi_{it}$) e de etanol anidro ($Prod\ an_{it}$).

$$mixa_{it} = \frac{Prod\ aç_{it} \times 1,0495}{(Prod\ aç_{it} \times 1,0495) + (Prod\ hi_{it} \times 1,6761) + (Prod\ an_{it} \times 1,7492)} \quad (50)$$

$$mixe_{it} = 1 - mixa_{it} \quad (51)$$

Os indicadores resultantes $mixa_{it}$ e $mixe_{it}$ são a proporção (%) de cana-de-açúcar destinada à fabricação de açúcar e de etanol, respectivamente, pela usina i na safra t .

Similarmente ao cálculo do mix, aquele relativo à variável explicativa Q_{it} – a qualidade da matéria-prima da indústria i no ciclo t , expressa em kg de ATR contido em uma tonelada de cana-de-açúcar moída – demanda idêntica transformação dos produtos em ATR.

$$Q_{it} = \frac{(Prod\ aç_{it} \times 1,0495) + (Prod\ hi_{it} \times 1,6761) + (Prod\ an_{it} \times 1,7492)}{moagem_{it}} \quad (52)$$

Esta qualidade refere-se à concentração na planta dos açúcares glicose, frutose e sacarose, sendo este último o principal componente orgânico tanto para a produção do açúcar quanto do etanol. Quanto maior Q_{it} , melhores os atributos dessa cana que, uma vez processada, permitem à usina obter o máximo de rendimento e produtividade para os produtos de seu interesse.

Adicionalmente aos dados do SAPCana compilados e verificados pela UNICA, a entidade coleta e processa muitas outras informações sobre o setor sucroenergético. Dentre elas, citam-se as datas de início e de término de safra para cada unidade i , o que possibilita contabilizar o número de dias (D_{it}) em que ela esteve “em safra” (moendo e industrializando) durante cada ciclo agrícola t .

Embora o período oficial da safra de cana-de-açúcar na região Centro-Sul estenda-se de abril a março do ano subsequente, a moagem concentra-se entre maio a novembro e diversos fatores influenciam a fixação daquelas datas – a oferta de matéria-prima, o clima, a disponibilidade de recursos financeiros... Assim, é comum existir usinas que postergam enquanto outras antecipam o fim de suas operações em cada temporada, o mesmo ocorrendo com a retomada da moagem. Por exemplo, por falta de cana, a entressafra pode iniciar mais

cedo e durar mais, pois, igualmente, não haverá matéria-prima para antecipar o início da safra seguinte. Ante uma eventual geada, é preciso replanejar o cronograma de colheita, priorizando as áreas afetadas para minimizar os impactos negativos sobre a produção.

Outra informação relevante pesquisada pela UNICA é a capacidade diária de moagem por usina ($capacidade_{it}$, em toneladas por dia). Essa informação, juntamente com D_{it} e com a quantidade processada de cana-de-açúcar $moagem_{it}$, resultam no indicador de Aproveitamento de Moagem A_{it} (%).

$$A_{it} = \frac{moagem_{it}}{D_{it} \times capacidade_{it}} \quad (53)$$

Esse indicador reflete as interrupções da moagem, decorrentes de contratemplos eventuais (fila no descarregamento, greve, falta de transbordo), de manutenções (programadas ou não) e das condições climáticas.

Como qualquer indústria, as usinas necessitam de manutenção preditiva, corretiva e preventiva, desde a oficina agrícola à fábrica. Durante a entressafra, quando comercializam 20% do seu faturamento anual, elas priorizam as intervenções mais abrangentes e complexas.

Mas o clima é, sobretudo, o principal determinante de A . O excesso de chuvas, por exemplo, diminui A ao dificultar a operacionalização da colheita. Este recuo em A implica: mais tempo gasto para processar a matéria-prima disponível, onerando os custos e reduzindo o tempo de manutenção para a próxima safra; mais cana processada fora do estágio ideal de maturação, em detrimento da produção de açúcar, especialmente. Mesmo no caso do etanol, dependendo do tempo de parada, as reações químicas necessárias a sua produção sofrem interferências, prejudicando a eficiência.

Para tornar o texto mais objetivo, ao longo da apresentação dos resultados no capítulo seguinte, optou-se por identificar todas as variáveis supracitadas segundo suas respectivas siglas, pormenorizadas na Tabela 5.

Tabela 5. Descrição das variáveis utilizadas nos modelos A e B.

Variável	Descrição	Unidade de medida
<i>Variáveis explicativas do modelo A</i>		
Ka_{it}	Kg de açúcar produzidos por tonelada de cana-de-açúcar processada	kg açúcar/ton. cana
Le_{it}	Litros de etanol produzidos por tonelada de cana-de-açúcar processada	litro etanol/ton. cana
<i>Variáveis explicativas do modelo B</i>		
$mixa_{it}$	mix de açúcar – proporção da cana processada destinada à produção de açúcar	%
$mixe_{it}$	mix de etanol – proporção da cana processada destinada à produção de etanol	%
<i>Variáveis exógenas</i>		
Q_{it}	Qualidade da cana-de-açúcar	kg ATR/ ton. cana
D_{it}	Dias em safra	nº de dias
A_{it}	Aproveitamento de moagem	%
Pa_{it}	Preço do açúcar – valor real de março de 2019	R\$/ kg ATR
Pe_{it}	Preço do etanol – valor real de março de 2019	R\$/ kg ATR
$Prel_{it}$	Preço relativo entre etanol e açúcar (Pe/Pa)	
Ca_{it}	Capacidade de produção de açúcar	kg açúcar/ton. cana
Ce_{it}	Capacidade de produção de etanol	litro etanol/ ton. cana
<i>Subscritos</i>		
i	Usina anexa no Estado de São Paulo e em operação entre 2010 e 2018	
t	Ano safra – abril até março do ano subsequente	

4 RESULTADOS

A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas e a decomposição de variância para cada variável, dependentes e exógenas, utilizadas nos modelos A e B.

A rubrica *overall* contempla todo o conjunto de 1.071 observações ao calcular a média, o desvio-padrão, os valores mínimo e máximo da respectiva variável. Dessa forma, consiste na diferença de determinado registro de uma das 119 usinas amostradas, em uma das 9 safras, em relação a todos os demais dados (isto é, para a base completa) daquela mesma variável. Conceitualmente, significa que o desvio-padrão de 20,0721 de Ka , por exemplo, é o valor médio desses desvios para as 1.071 observações. Essa variação, por sua vez, se decompõe em dois elementos: a variância entre (*between*) as 119 unidades produtoras e aquela calculada para as 9 safras em apreço para cada usina (intra ou *within*). Camereon e Trivedi (2009) especificam as fórmulas de cada uma dessas variâncias.

Os preços (relativo, inclusive) e os dias de safra apresentam desvio-padrão *within* superior ao *between*, indicando que, para essas variáveis, não se observam comportamentos muito distintos ao longo do tempo entre as usinas (*between*). A maior alteração ocorre para cada unidade no decorrer do tempo (*within*). Esse comportamento se dá em função da sistemática empregada para a estruturação de Pa_{it} e Pe_{it} , detalhada na seção 3.4.1. e que, como mencionado previamente, resulta em um preço referencial e não naquele realmente recebido por cada unidade produtora.

De qualquer forma, essa configuração remete à possibilidade de correlação entre os termos do intercepto α_i com os regressores Pe , Pa , $Prel$ e D tal como previsto pelo método de estimação via EF.

O fenômeno oposto ocorre para as demais variáveis. Alterações temporais no mix no universo de cada usina (*within*) existem, mas são inferiores às discrepâncias de mix entre elas (*between*). Ou seja, há diferenças acentuadas entre as 119 unidades no que diz respeito ao mix observado em cada ciclo, porém cada uma delas tende a manter certo patamar para o mix ao longo do período.

Logo, a heterogeneidade entre as empresas avaliadas pode inserir um impacto aleatório sobre o intercepto do modelo a ser estimado, de maneira que α_i e o termo de erro idiossincrático u_{it} sejam independentes - fato que é considerado quando da estimação de um modelo por EA.

A mesma consideração cabe às variáveis Ka , Le , Q , Ca , Ce e A . Em relação a esse último elemento, A , os desvios entre e intra usinas são próximos. Ou seja, a variação de A

entre as unidades produtoras é bastante similar àquela observada para uma usina ao longo do tempo. Ao extrair aleatoriamente duas empresas da amostra, espera-se que a diferença em A entre elas seja praticamente igual à diferença desse indicador para uma mesma usina entre dois anos selecionados aleatoriamente.

Em suma, a Tabela 6 identifica variáveis com maior variância *within* e outras com maior variância *between*, o que sugere adequação aos métodos por EF e por EA, respectivamente.

Ademais, todos os regressores apresentam desvio-padrão *within* diferente de zero: seus dados e se alteram ao longo do tempo para cada i . Isso possibilita valorar todos os seus respectivos parâmetros por EF, caso seja este o método selecionado (WOOLDRIDGE, 2016).

A Tabela 6 traz, portanto, indicações relevantes sobre o comportamento das variáveis. Trata-se, porém, de um diagnóstico preliminar, que não esgota o debate sobre qual das técnicas de estimação utilizar. Para tanto, é fundamental estimar os modelos propostos aplicando os três métodos detalhados anteriormente, bem como conduzir os testes de robustez.

Por fim, é válido esclarecer o procedimento de cálculo das rubricas máximo e mínimo pelos programas R e Stata. Isso porque, por exemplo, o mínimo do indicador Ka em *within* (-16,99 kg de açúcar por tonelada) é ilógico e, de fato, sequer consta no painel construído. Outro exemplo refere-se ao mix de etanol (*mixe*), cujo limite superior em *within* totaliza 116,6% (como destinar mais de 100% da cana-de-açúcar cultivada à produção de etanol?). Novamente, essa cifra incoerente não está na base.

Essas colunas reportam o mínimo e o máximo de X_{it} para a rubrica *overall*; \bar{X}_i para *between*; e $(X_{it} - \bar{X}_i + \bar{X})$ para a linha *within* - sendo X_i o dado do indicador X para a usina i na safra t ; \bar{X}_i a média da variável X para cada empresa i ; e \bar{X} a média global dessa variável do painel completo. Nesse último caso (*within*), o comando do Stata adiciona a média global \bar{X} do indicador em análise (67,59 para Ka) à diferença $(X_{it} - \bar{X}_i)$, visando tornar os resultados *within* e *between* comparáveis.

Tabela 6. Estatísticas descritivas e decomposição da variância para os modelos A e B.

Variável		Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Observações
Ka	<i>overall</i>	67,59	20,0721	0,0000	114,0905	N = 1.071
	<i>between</i>		15,7703	11,6112	102,3848	n = 119
	<i>within</i>		12,4919	-16,9869	115,6847	T = 9
Le	<i>overall</i>	37,42	14,1320	0,0000	89,9794	N = 1.071
	<i>between</i>		11,5803	0,0000	79,3776	n = 119
	<i>within</i>		8,1616	-1,2939	84,0082	T = 9
mixa	<i>overall</i>	0,53	0,1696	0,0000	1,0000	N = 1.071
	<i>between</i>		0,1394	0,0816	1,0000	n = 119
	<i>within</i>		0,0972	-0,1696	0,9958	T = 9
mixe	<i>overall</i>	0,47	0,1696	0,0000	1,0000	N = 1.071
	<i>between</i>		0,1394	0,0000	0,9184	n = 119
	<i>within</i>		0,0972	0,0042	1,1696	T = 9
Pa	<i>overall</i>	1,16	0,1785	0,8772	1,4594	N = 1.071
	<i>between</i>		0,0152	1,1258	1,1856	n = 119
	<i>within</i>		0,1779	0,9093	1,4429	T = 9
Pe	<i>overall</i>	0,98	0,0499	0,9047	1,0775	N = 1.071
	<i>between</i>		0,0068	0,9627	0,9919	n = 119
	<i>within</i>		0,0495	0,9210	1,0648	T = 9
Q	<i>overall</i>	134,72	10,8313	23,3720	159,2874	N = 1.071
	<i>between</i>		8,3752	97,5302	147,8887	n = 119
	<i>within</i>		6,9064	42,7190	165,3411	T = 9
Prel	<i>overall</i>	0,86	0,1186	0,6709	1,0979	N = 1.071
	<i>between</i>		0,0076	0,8384	0,8788	n = 119
	<i>within</i>		0,1183	0,6770	1,0817	T = 9
D	<i>overall</i>	235,24	32,8758	68,0000	365,0000	N = 1.071
	<i>between</i>		19,2448	190,1111	286,1111	n = 119
	<i>within</i>		26,7063	111,0224	371,1335	T = 9
A	<i>overall</i>	0,73	0,1101	0,2591	0,9630	N = 1.071
	<i>between</i>		0,0883	0,3682	0,8978	n = 119
	<i>within</i>		0,0662	0,3965	0,9893	T = 9
Ca	<i>overall</i>	78,85	18,4006	0,0000	127,8715	N = 1.071
	<i>between</i>		16,4817	13,2682	127,8715	n = 119
	<i>within</i>		8,3046	8,1259	125,2938	T = 9
Ce	<i>overall</i>	50,69	17,7977	0,0000	93,9935	N = 1.071
	<i>between</i>		17,5452	0,0000	93,9935	n = 119
	<i>within</i>		3,3506	31,6925	92,4631	T = 9

Concluída a apresentação da estatística descritiva das variáveis, coube estimar os modelos A e B a partir dos três métodos em estudo de regressão com dados em painel, balanceado e curto ($T < N$). A Tabela 7 e a Tabela 8 reportam estas estimativas derivadas da aplicação das técnicas de POLS, EF e EA sequencialmente, bem como os resultados dos testes descritos no capítulo anterior.

De antemão, destaca-se que todos os determinantes das ofertas de açúcar e de etanol (modelo A), bem como do mix de produção (modelo B) revelaram-se: estatisticamente significativos; com os sinais esperados, consonantes ao racional técnico-econômico; e com valores estimados muito semelhantes, dentre as três técnicas. Particularmente, a abordagem do EF mostrou-se a mais apropriada quando da formalização dos testes.

4.1 Modelo A

Todas as variáveis exógenas apresentam alta relevância estatística, aos níveis tradicionais de significância de 1% e 5% (este último, apenas para a variável D no método POLS). Pela avaliação do valor- p e do teste t individual, deve-se rejeitar a hipótese nula de que os coeficientes sejam iguais à zero.

Assim, a seleção do método mais adequado ao modelo (se EF, EA ou POLS) fundamenta-se nos resultados dos três testes de robustez pormenorizados no capítulo anterior.

O teste LM de Breusch-Pagan, aplicado após a estimação de EA, indica a rejeição da H_0 de que o modelo POLS seria adequado comparativamente ao de EA. Dessa forma, as usinas paulistas possuem características próprias e não observáveis; isto é, existem diferenças estatisticamente significantes (a 1%) entre elas ao longo das safras, o que justifica a aplicação da modelagem em painel.

Igualmente, o resultado do teste F de Chow também sugere o uso da estimação em painel. Segundo ele, deve-se rejeitar a H_0 de que há igualdade de interceptos e inclinações para todas as usinas, ou seja, de que a regressão *pooled* seria a opção apropriada. Portanto, aplicar a técnica de EF (a hipótese alternativa desse teste) é recomendado.

Uma vez referendado o uso da regressão em painel, resta desenvolver o teste de Hausman para decidir entre o modelo estimado por EF ou por EA. Nesse caso, o resultado aponta para a rejeição de H_0 , relativa à consistência e eficiência dos estimadores de EA, a 1% de significância. Desta forma, os efeitos individuais α_i das usinas estão correlacionados com as variáveis explicativas e, portanto, não são aleatórios. Cabe utilizar o modelo de EF.

Logo, concentrando-se sobre os resultados do modelo de EF, observa-se o impacto positivo de Pa sobre a oferta Ka . Um aumento de R\$ 0,10 por kg de ATR desse preço implica em um acréscimo de 1,83 kg de açúcar por tonelada de cana processada. Sobre o produto concorrente no uso da matéria-prima, o etanol, verificou-se impacto contrário e mais forte: Ka diminui em 2,76 kg por tonelada diante de um acréscimo de R\$ 0,10 por kg de ATR em Pe .

De maneira similar, as oscilações nos preços afetam expressivamente Le e em igual direção àquela verificada para Ka . Um incremento de R\$ 0,10 por kg de ATR em Pe expande a oferta em 1,72 litro de etanol por tonelada de cana-de-açúcar, enquanto um aumento de mesma grandeza em Pa diminui Le em 1,14 litro por tonelada.

Essas estimativas, por sua vez, permitem o cálculo de indicador chave: a elasticidade preço da oferta associada a cada produto i (ϵ_i). Para tanto, empregou-se o método do ponto médio, definido na equação 54.

$$|\epsilon_i| = \frac{\Delta Q_i}{\Delta P_i} \times \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \quad (54)$$

Em que: ΔP_i corresponde à oscilação de preços do bem i entre dois pontos (neste exercício, o máximo e o mínimo da amostra); \bar{P} à média aritmética entre tais valores; ΔQ_i à projeção da variável dependente (Ka ou Le) obtida a partir da estimação do modelo A via EF e considerando estritamente àquela oscilação nos preços (Pa ou Pe , respectivamente).

É pertinente esclarecer que o emprego do método do ponto médio deve-se ao valor zero de algumas variáveis (algumas unidades apresentaram mix de produção igual à zero para um dos produtos em um ou mais anos da análise). Por isso, não foi possível trabalhar com os modelos A e B na sua forma logarítmica, o que permitiria a leitura dos coeficientes diretamente como elasticidades.

No caso do etanol, a elasticidade totalizou 0,384: um aumento de 1% no preço do renovável eleva a sua oferta em 0,384%. A lógica subjacente aplica-se ao açúcar, para o qual um aumento de mesma magnitude do seu preço amplia a sua oferta em 0,378%.

Contudo, os estudos que também quantificam para o mercado brasileiro a elasticidade preço da oferta do açúcar abarcam o período de regulamentação do setor sucroenergético nacional. Esse atributo inviabiliza qualquer comparação crível por constituir outro cenário operacional para as usinas.

Todavia, no caso do etanol hidratado, pode-se confrontar a cifra supracitada de 0,384 com a estimativa obtida por Costa *et al.* (2015) de 0,75, citado em revisão bibliográfica.

Diferenças nos escopos de ambos os estudos justificam essa sensível discrepância entre os resultados. A presente pesquisa capta o impacto de flutuações no preço do biocombustível estritamente sobre o mix de produção - isto é, sobre quanto a usina decide alocar sua matéria-prima entre as produções de açúcar ou de etanol. Estudo de Costa *et al.* (2015) contempla este impacto sobre o mix (“efeito mix”), bem como sobre o montante disponível de cana-de-açúcar (“efeito cana”). Dessa forma, um incremento na produção da matéria-prima permite maior resposta da oferta total de etanol.

No que tange à capacidade produtiva, a expansão de Ca acarreta um crescimento de Ka : ampliar aquela capacidade em 1 kg de açúcar por tonelada moída eleva Ka em 0,95 kg por tonelada. O mesmo comportamento aplica-se ao etanol hidratado.

De fato, investir em ativo imobilizado – seja para fins de expansão de capacidade (aumento da oferta de produtos), de substituição (reposição de equipamentos) ou de modernização (racionalização do sistema produtivo) – implica comprometer capital de forma irreversível. Por conseguinte, um investimento dessa ordem, com um alto custo de oportunidade atrelado, necessariamente se traduz em uma maior produção.

Paralelamente a essa associação paramétrica positiva entre Ca e Ka (Ce e Le), quase unitária, verificou-se um impacto inverso sobre o produto concorrente pela matéria-prima. Por exemplo: a cada adicional de 1 litro por tonelada em Ce , Le cresce em 1,08 litro por tonelada, mas tal ampliação em Ce reduz a produção de açúcar Ka em 1,69 kg por tonelada.

A variável D mostrou-se negativamente relacionada à Ka , resultado coerente à dinâmica operacional. Para entendimento dessa dinâmica cabe atentar ao indicador de pureza aparente do caldo e a sua inter-relação com o rendimento industrial.

O caldo que forma a cana-de-açúcar²⁵ é majoritariamente composto por água (80%) e o restante por sólidos solúveis. Estes, cuja representatividade (no caldo) chama-se BRIX, compreendem tanto os sólidos açúcares (sacarose, frutose e glicose) quanto não açúcares. Enquanto a glicose e a frutose presentes no caldo são identificadas pela sigla AR (de Açúcares Redutores), denomina-se POL o percentual de sacarose (também contida no caldo). Este último é o componente mais importante posto ser o único dentre os açúcares a cristalizar.

Assim, o rendimento industrial é consequência direta da quantidade de sacarose da matéria-prima processada, o que denota uma associação positiva entre a maximização desse

25 Fibra (de 10% a 18%) e caldo (82% a 90%) formam a cana-de-açúcar.

rendimento e o indicador de pureza aparente, definido como a percentagem de sacarose (POL) contida nos sólidos solúveis (BRIX).

Especificamente, quando a cana-de-açúcar está madura, ela apresenta alto acúmulo de sacarose (alto POL) e baixo AR, o que resulta em uma elevada pureza aparente do caldo. O processamento da matéria-prima com essas características facilita extrair os cristais de sacarose, ou seja, produzir açúcar. Em contrapartida, caso esteja em processo de maturação ou deteriorada, a cana possui alto AR, baixo POL e, consequentemente, reduzida pureza aparente do caldo. Essas condições aumentam a cor do açúcar e dificultam a cristalização da sacarose.

Em virtude dessas propriedades, é mais interessante sob o ponto de vista técnico priorizar a produção de açúcar quando da elevada pureza do caldo - o que ocorre no meio do ciclo agrícola, como mostra a Figura 20. Já uma pureza menor (no começo e ao final do ciclo) prejudica o rendimento industrial do açúcar, sendo, portanto, desejável fabricar etanol.

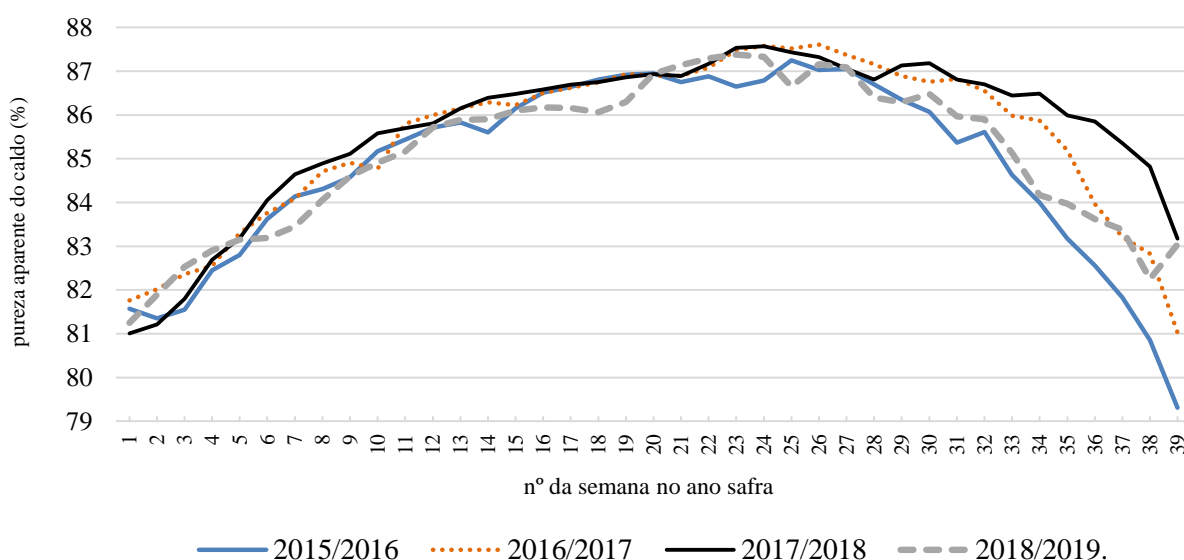


Figura 20. Evolução semanal da pureza aparente do caldo (%) nas usinas paulistas, para as 4 últimas safras.

Fonte: Sistema ATR, CONSECANA-SP. Nota: (i) dados consistem em amostras da cana-de-açúcar processada pelas usinas do Estado de São Paulo, coletadas no momento da sua entrega na unidade industrial e submetidas à análise laboratorial; (ii) numeração das semanas de acordo com o ano safra, iniciando em 1º de abril e finalizando em 31 de dezembro; após essa data, a amostra diminui significativamente.

Em decorrência desse comportamento, caso a usina conclua a safra uma quinzena antes (ou inicie o ciclo seguinte tardiamente), a oferta de açúcar aumenta 0,68 kg por tonelada de cana. Diferentemente, essa mesma oscilação em D , ao restringir os períodos em que fabricar etanol é recomendável, diminui Le em 0,43 litro por tonelada.

No sentido inverso ao impacto de D , a variável A apresenta uma relação positiva com Ka e negativa com Le . Ainda que reflita qualquer interrupção na moagem, inclusive programada, essa variável sofre a marcante influência do clima sobre as operações de colheita, pois essas operações são majoritariamente mecanizadas. Desde 2015, mais de 90% dos canaviais no Estado de São Paulo são colhidos de forma mecanizada, sem queima (CONAB).

Assim, em safras típicas, o inverno seco favorece o corte. Colhedoras e carretas de transbordo conseguem facilmente acessar as lavouras, respeitando o cronograma de colheita. Elaborado para que a operação ocorra no pico de maturação da cultura, o cumprimento desse cronograma significa a oferta de matéria-prima à indústria em ritmo contínuo, refletindo em um alto A ; e com alto teor de sacarose, em benefício da fabricação de açúcar. Dessa forma, para expandir Ka em 0,25 kg por tonelada, é preciso ampliar A em quase 10 pontos percentuais (p.p.).

A dinâmica oposta ocorre em safras chuvosas. O tráfego dos equipamentos no terreno com excesso de umidade compacta o solo, reduz a produtividade agrícola nos ciclos posteriores e compromete a longevidade da cultura. Em dias com chuva, é impraticável às máquinas adentrar nos canaviais. Como consequência, maior o número de dias parados, menor o A e, como a indústria precisa interromper a sua operação, pior o rendimento industrial na fabricação de açúcar - sendo, por analogia, recomendável fabricar etanol. Nesse contexto, um declínio de 10 p.p. em A torna oportuno direcionar a cana-de-açúcar colhida ao renovável, elevando Le em 0,20 litros por tonelada.

A única variável com o mesmo sinal, positivo, em ambas as regressões do modelo A foi, como esperado, Q . Sua relação positiva com Ka e com Le demonstra que *ceteris paribus* o maior teor de açúcares na planta (ou seja, alto Q) reverte-se diretamente em um incremento na disponibilidade de ATR conversível em produtos, a despeito dos preços praticados.

De fato, uma vez disponível determinado montante de sacarose, o racional econômico invoca a otimização de seu uso, seja para produzir açúcar ou biocombustível.

Tabela 7. Estimativas dos determinantes de *Ka* e *Le*.

Variável dependente	<i>Ka</i>			<i>Le</i>		
Variável exógena	POLS	EF	EA	POLS	EF	EA
Pa	23,0107*** (2,1248)	18,3002*** (1,6085)	21,9726*** (1,8342)	-14,3238*** (1,3383)	-11,4469*** (1,0100)	-13,7558*** (1,1591)
Pe	-42,1986*** (7,5568)	-27,5725*** (5,6483)	-35,8676*** (6,4974)	25,9897*** (4,7597)	17,3219*** (3,5466)	22,4241*** (4,1061)
Q	0,2948*** (0,0329)	0,3991*** (0,0358)	0,3603*** (0,0377)	0,4025*** (0,0208)	0,3441*** (0,0225)	0,3661*** (0,0238)
D	-0,0257** (0,0101)	-0,0454*** (0,0092)	-0,0265*** (0,0101)	0,0158** (0,0064)	0,0286*** (0,0058)	0,0163** (0,0064)
A	0,2771*** (0,0306)	0,1567*** (0,0380)	0,3108*** (0,0375)	-0,1772*** (0,0193)	-0,0982*** (0,0239)	-0,1983*** (0,0237)
Ca	0,7630*** (0,0230)	0,9555*** (0,0295)	0,8086*** (0,0289)	-0,4715*** (0,0145)	-0,5995*** (0,0186)	-0,5032*** (0,0183)
Ce	-0,2347*** (0,0238)	-1,6960*** (0,0742)	-0,4087*** (0,0383)	0,1444*** (0,015)	1,0818*** (0,0466)	0,2535*** (0,0242)
Constante	-19,8149** (9,4840)	29,5487*** (9,9569)	-30,6719*** (9,9215)	13,3640** (5,9735)	-19,7912*** (6,2519)	19,4825*** (6,2688)
R ²	0,7193	0,6765		0,7753	0,7012	
R ² overall		0,5905	0,7128		0,6564	0,7675
R ² between		0,7204	0,8374		0,7690	0,8752
R ² within		0,6765	0,5823		0,7012	0,6089
Teste F (Chow)		9,93***			10,05***	
Teste Breusch Pagan			291,29***			275,98***
Teste de Hausman			295,98***			305,88***
Observações	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071

Nota: *** significativo a 1%; ** significativo a 5%; * significativo a 10%.

4.2 Modelo B

Os resultados alcançados no modelo B (Tabela 8) corroboram todos aqueles obtidos pela representação A, o que contribui para a robustez das análises ora desenvolvidas.

Os testes F de Chow e LM de Breusch-Pagan sustentam a hipótese da presença de efeitos não-observáveis afetando o mix de açúcar no Estado de São Paulo. Nesse caso, as estimativas obtidas pela regressão *pooled* são viesadas e inconsistentes, mesmo para grandes amostras, devido à omissão de variável relevante. Trata-se do “viés de heterogeneidade” designado por Wooldridge (2016).

Portanto, é preciso focar as análises nas estimativas derivadas de métodos capazes de controlar a presença de heterogeneidade não observada. O teste de Hausman ratifica esse entendimento ao evidenciar estatisticamente a existência de correlação entre os efeitos não-observáveis e as variáveis exógenas, isto é, deve-se rejeitar a hipótese nula de ausência de

correlação entre a_i e X_{it} . Assim, a abordagem via EF configura novamente a melhor opção diante da consistência do estimador de MQO, ao contrário daquele computado via MQG.

Com enfoque, portanto, no modelo de EF nota-se que todas as variáveis explicativas são estatisticamente significantes a 1%. Seus sinais seguem em conformidade aos princípios econômicos e à dinâmica operacional do setor sucroenergético, elucidada na seção anterior.

Dentre o vetor de regressores, *Prel*, definido pela razão entre *Pe* e *Pa*, exerce o maior impacto sobre a variável exógena: um crescimento de 1 p.p. reduz *mixa* em 0,19 p.p. *ceteris paribus*. Já *A* induz a um movimento inverso, de sorte que seu incremento em 1 p.p. ocasiona uma ampliação de 0,12 p.p. naquele *mix*.

Os demais controles (*D*, *Ca*, *Ce*), embora apresentem um efeito marginal inferior àqueles supracitados (de *Prel* e *A*), são igualmente importantes estatisticamente para determinar o comportamento da quantidade de matéria-prima destinada à produção de açúcar.

Em vista da indubitável confirmação entre os resultados obtidos pelos modelos A e B para a produção de açúcar, e à complementariedade natural entre *mixa* e *mixe*, optou-se por não detalhar textualmente os impactos relativos à estimação de *mixe*.

Tabela 8. Estimativas dos determinantes de *mixa*.

Variável dependente	<i>mixa</i>		
Variável exógena	POLS	EF	EA
Prel	-0,2544*** (0,0241)	-0,1952*** (0,0181)	-0,2368*** (0,0198)
D	-0,0002** (0,0001)	-0,0003*** (0,0001)	-0,0002* (0,0001)
A	0,1793*** (0,0255)	0,1272*** (0,0321)	0,2292*** (0,0310)
Ca	0,0062*** (0,0002)	0,0072*** (0,0002)	0,0063*** (0,0002)
Ce	-0,0021*** (0,0238)	-0,0129*** (0,0742)	-0,0038*** (0,0383)
Constante	0,2817*** (0,0407)	0,7624*** (0,0535)	0,3011*** (0,0461)
R ²	0,7132	0,6134	
R ² overall		0,6125	0,7031
R ² between		0,7252	0,8131
R ² within		0,6134	0,5402
Teste F (Chow)		10,09***	
Teste Breusch Pagan			467,77***
Teste de Hausman			220,86***
Observações	1.071	1.071	1.071

Nota: *** significativo a 1%; ** significativo a 5%; * significativo a 10%.

Além dessas variáveis de cunho técnico, também foram avaliados elementos que capturassem a influência da saúde financeira da usina sobre a sua oferta. O entendimento é de que as unidades descapitalizadas, com restrições de acesso a financiamento, optem por privilegiar a produção de etanol: sendo um mercado mais líquido em relação ao de açúcar, gera um fluxo de caixa operacional na velocidade (mais intensa) requerida por essas unidades alavancadas.

Para tanto, recorreu-se à coleta dos balanços patrimoniais e demonstrações contábeis das unidades amostradas. Entretanto, as informações disponíveis viabilizaram a composição de um painel balanceado para apenas 81 das 119 originalmente avaliadas e, ainda, com início a partir da safra 2013/2014 – ou seja, $T'=6$ contra $T=9$ dos modelos A e B. Houve, portanto, a perda expressiva de 585 observações.

Adicionalmente, é possível supor um viés de seleção pelo qual as empresas com uma gestão corporativa sólida e transparente sejam aquelas que de fato publiquem seus dados contábeis e financeiros, devidamente auditados, como uma forma de reafirmar a sua saúde financeira perante a sociedade e investidores.

Assim, apesar das inúmeras tentativas em incorporar às regressões indicadores de liquidez e endividamento, optou-se por excluí-los, pois não contribuíram para aprimorar a robustez das análises. Ao contrário, sempre se revelaram inadequados aos postulados econométricos. Seus coeficientes assumiam valores reduzidos e sem significância estatística; quando significativos, deturpavam os sinais de outras variáveis técnicas.

Por fim, cabe ainda destacar que a dinâmica aqui apresentada deve ser influenciada nos próximos anos pela recém-iniciada Política Nacional de Biocombustíveis, conhecida como *RenovaBio*²⁶.

Voltada à promoção da segurança energética e à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transportes, ela busca incentivar o uso de biocombustíveis no Brasil. Para tanto, dentre outros mecanismos, estabelece a certificação do processo produtivo²⁷, a qual fixa uma Nota de Eficiência Energética-Ambiental ao respectivo produtor (ou importador) e o habilita a emitir o Crédito de Descarbonização (CBIO) em quantidade proporcional àquela nota e ao volume de biocombustível comercializado.

Equivalente a uma tonelada de emissão de CO₂ evitada, o CBIO consiste em um ativo negociável em mercado organizado a ser adquirido pelos agentes distribuidores de

²⁶ *RenovaBio* foi instituído pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e regulamentado pelo Decreto nº 9.308, de 15 de março de 2018.

²⁷ Resolução ANP nº 758 de 23 de novembro de 2018.

combustíveis, parte obrigada do Programa: tais agentes devem comprar esses CBIOS para cumprirem suas respectivas metas de descarbonização fixadas pela ANP, sob pena de incorrerem no pagamento de multa e suspensão de suas atividades.

Porém, a eventual incidência de multa “não isenta o distribuidor do cumprimento de sua meta anual, devendo a meta de quantidade de CBIOS não cumprida ser acrescida à meta aplicável ao distribuidor no ano seguinte” (ANP, 2019, p. 4)²⁸. A regulação também prevê que o agente comprove a consecução de até 15% da sua meta no ano subsequente, “[...] desde que tenha cumprido integralmente a meta no ano anterior (t-1)” (ANP, 2019, p. 3).

Além desses dispositivos, é essencial atentar para duas características do CBIO: sua perpetuidade e fungibilidade. Sem vencimento, é “aposentado” (retirado definitivamente de circulação e com negociação encerrada) após pedido encaminhado pelo detentor do crédito ao escriturador²⁹.

Ainda, o CBIO tem lastro físico. O produtor de etanol, munido do seu Certificado de Produção, pode requerer a emissão do seu crédito entre 15 a 60 dias da data da Nota Fiscal eletrônica (NF-e) de venda do biocombustível por ele produzido³⁰.

A lógica apresentada indica que a regulamentação do RenovaBio contempla mecanismos adaptados à dinâmica da produção de biocombustíveis no País, permitindo que as metas de descarbonização sejam atendidas ao longo do tempo e ponderando sobre variações pontuais da oferta de renováveis. Nesse contexto, considera a possibilidade de estocar CBIOS em períodos de superprodução e a ausência de qualquer mandato fixo para um determinado tipo de biocombustível (ou seja, não há diferença entre CBIOS gerados a partir do etanol ou do biodiesel, por exemplo).

Ao produtor de etanol, vislumbra-se: i) uma nova fonte de receita fundamentada nas externalidades positivas do seu produto; ii) um estímulo para a ampliação da eficiência energética-ambiental do seu sistema produtivo; e, iii) a introdução de uma nova variável na sua decisão de produção.

Esse último item se relaciona intimamente com o tema avaliado neste estudo. Isso porque, o detalhamento do Programa evidencia que ao preço líquido do etanol deve-se acrescentar a receita obtida com a venda de CBIOS para, só então, comparar o ganho relativo entre o renovável e o açúcar. Logo, apesar de não alterar a lógica e o modelo conceitual utilizados na análise aqui conduzida, esse novo cenário indica claramente que a dinâmica da

²⁸ Resolução ANP nº 791, de 12 de junho de 2019.

²⁹ Portaria MME nº 419, de 20 de novembro de 2019.

³⁰ Resolução ANP nº 802, de 05 de dezembro de 2019.

precificação no mercado de CBIOs deve ser considerada quando da tomada de decisão pela usina sobre o seu mix.

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou investigar os determinantes da decisão pelas usinas quanto à alocação da cana-de-açúcar entre as produções de etanol e de açúcar. Trata-se de uma flexibilidade que capacita o Brasil a responder às mudanças nas cotações dessas *commodities* ainda no curto prazo, algo sem paralelo na agroindústria canavieira do mundo.

A condução desta análise abarcou a construção de dois modelos econômicos, distintos apenas quanto à variável dependente representativa daquela flexibilidade. Em um primeiro modelo, tal variável corresponde ao rendimento industrial, isto é, à quantidade produzida de cada bem (em litros para o etanol e em kg para o açúcar) por tonelada de cana-de-açúcar processada. No segundo modelo, utilizou-se como elemento endógeno o mix de produção: a porcentagem da matéria-prima direcionada à fabricação de cada *commodity*.

Os resultados confirmaram a expectativa de que os preços desses produtos influenciam de forma decisiva a escolha da destinação da matéria-prima. Com efeito, um crescimento de R\$ 0,10 por kg de ATR no preço do açúcar amplia sua produção em 1,83 kg por tonelada de cana moída e reduz o volume fabricado de etanol hidratado em 1,14 litro por tonelada. Quando o mix é considerado como variável dependente, este aumenta em 1,95 p.p. diante da retração de 1 p.p. no preço relativo entre etanol *versus* açúcar.

Sob a ótica do biocombustível, a dinâmica permanece. Se inflacionado R\$ 0,10 por kg de ATR, sua oferta expande em 1,73 litro por tonelada, em detrimento do açúcar, cuja quantidade fabricada cai 2,76 kg por tonelada.

A despeito da importância dos preços sobre a decisão alocativa das usinas, a elasticidade da oferta do açúcar tomada no ponto médio atingiu apenas 0,378. Em relação ao etanol hidratado, este parâmetro totalizou 0,384.

Essa sensibilidade limitada da oferta frente às flutuações de preços decorre das restrições impostas por aspectos técnicos e operacionais associados ao processo produtivo. A saber, os resultados atestaram que a capacidade instalada, a qualidade da matéria-prima, o nível de aproveitamento de moagem ao longo dos ciclos agrícolas e o período de safra (dias corridos de operação) são essenciais à escolha pela agroindústria quanto ao uso da cana-de-açúcar.

A melhora da qualidade da matéria-prima (mensurada em kg de ATR por tonelada) favorece a oferta de ambas as *commodities*, assim como um eventual incremento da capacidade de produção. No que tange ao número de dias em que a usina permaneceu em atividade na safra, o coeficiente estimado é positivo para o etanol hidratado e negativo para o

açúcar. O aproveitamento de moagem, por sua vez, impacta positivamente (negativamente) a alocação de cana-de-açúcar ao etanol (açúcar).

As evidências empíricas obtidas mostram que o impacto dos preços sobre a variável dependente é expressivamente maior do que àquele associado aos controles de ordem técnica. Não obstante, sustentam que a vertente econômica por si só não fundamenta a decisão alocativa das usinas.

As informações geradas neste estudo trazem indicações relevantes para o planejamento dos agentes públicos e privados que atuam nos mercados de açúcar e de etanol.

Além de responsável por quase metade do comércio mundial de açúcar, o Brasil influencia a cotação internacional da *commodity*. Em um cenário de déficit global, o País é o único apto a ajustar mais rapidamente a sua produção e, desta forma, suprir a demanda externa. Essa competência de arbitrar o mix de produção contrapõe à defasagem de resposta dos produtos agrícolas, cuja ampliação da oferta é restrita no curto prazo em virtude de eventos climáticos e características biológicas do processo produtivo (a necessidade de expansão da área plantada, por exemplo). Dessa forma, quantificar a dinâmica do *trade-off* enfrentado pelas usinas na alocação da cana-de-açúcar, como desenvolvido nesta pesquisa, é útil para o entendimento e a predição da oferta brasileira de açúcar.

Em relação ao etanol, é evidente a influência da produção do renovável no suprimento doméstico de combustíveis. Logo, a compreensão do racional produtivo é indispensável para o planejamento da logística interna, para a definição das estratégias comerciais dos agentes que operam nesse mercado e, ainda, para a antecipação de eventuais choques no suprimento energético do País.

Por fim, cabe ressaltar que o presente estudo, apesar de trazer considerações inéditas sobre o comportamento da oferta e os determinantes do mix de produção, não esgota o tema. Novas pesquisas contemplando todos os produtores nacionais são importantes, em que se pese o raro acesso a microdados setoriais para o emprego de modelagem de dados em painel.

O desenvolvimento de modelos de séries temporais também pode ser proveitoso ao viabilizar o detalhamento do tempo de resposta da oferta de etanol e de açúcar diante de alterações nas variáveis explicativas, peculiares ao sistema produtivo.

Outra sugestão refere-se à incorporação de variáveis de cunho financeiro (índices de liquidez e de endividamento) à pesquisa. Existe uma percepção de que unidades em pior condição financeira priorizem a produção de etanol. No presente estudo, não foi possível encontrar suporte estatístico para a verificação dessa hipótese.

Esta pesquisa também não abarca o RenovaBio, pois o seu funcionamento data de 2020. É imperativo, porém, considerá-lo em futuras análises. Suas potenciais repercussões sobre o ambiente de negócios setorial são latentes, com a agroindústria sucroenergética buscando ganhos econômicos, típicos de qualquer segmento produtivo, e ambientais. São novos desafios, que podem se converter em oportunidades diante da revolução em curso da economia de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil**. 2ª ed. Brasília: ANA, 2019. 53 p.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Dados abertos**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-abertos-anp>. Acesso em: 10 set. 2019.

_____. **Legislação do RenovaBio**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio/legislacao>. Acesso em: 30 jan. 2020.

ALVES, L. R. A. **Transmissão de preços entre produtos do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo**. 2002. 180 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

AREND, S. C. **O Instituto do Açúcar e do Alcool: os usineiros e a busca de rendas**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BACCHI, M. R. P.; LIMA, L. M.; BRAGATO, I. R. Preços de etanol no mercado doméstico: variabilidade e fundamentos. In: MARJOTTA-MAISTRO, Marta Cristina (Org.). **Desafios e perspectivas para o setor sucroenergético do Brasil**. São Carlos: EdUFSCar, 2011, p. 152-175.

BACCHI, M. R. P.; RODRIGUES, L. Estrutura de mercado e formação de preços na cadeia produtiva da cana-de-açúcar. In: BACHA, C. J. C.; ALVES, L. R. A. (Org.). **Panorama da agricultura brasileira: estrutura de mercado, comercialização, formação de preços, custos de produção e sistemas produtivos**. 1ª ed. São Paulo: Alínea, 2018, p. 50-80.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BACEN. **Sistema gerenciador de séries temporais**. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/localizarseries/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

BARROS, W. J. **Análise econométrica dos mercados interno e de exportação de açúcar**. 1975. 46 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1975.

BARROS, G. S. C. **Modelo econômico de determinação e variações de preços do açúcar e etanol**. Piracicaba, CEPEA/ESALQ/USP. 2009. Apud: CAMPOS, S. K. Fundamentos econômicos da formação do preço internacional do açúcar e dos preços domésticos de açúcar e etanol. Piracicaba, 2010. 141 p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2010.

BASTIAN-PINTO, C.; BRANDÃO, L.; HAHN, W. J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: the ethanol case. **Energy Economics**, Cambridge, v. 31, p. 411–422, 2009.

BENTIVOGLIO, D.; FINCO, A.; BACCHI, M. R. P. Interdependencies between biofuel, fuel and food prices: the case of the Brazilian ethanol market. **Energies**, Basel, v. 9, n. 6, art. 464, p. 1-16, 2016.

BRANCO, José Eduardo Holler *et al.* Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: application of a MINLP network equilibrium model. **Biomass and Bioenergy**, Cambridge, v. 127, 105249, p. 1-11, 2019.

BRASIL. Decreto n. 76.593, de 14 de novembro de 1975. Institui o Programa Nacional do Alcool e dá outras Providências. **Diário Oficial**, Brasília, 14 nov. 1975. Seção 1, p. 15257.

_____. Decreto n. 99.240, de 7 de maio de 1990. Dispõe sobre a extinção de autarquias e fundações públicas, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 8 mai. 1990. Seção 1, p. 8629.

_____. Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 27 dez. 2017. Seção 1, p. 4.

_____. Portaria MME n. 419, de 20 de novembro de 2019. **Diário Oficial**, Brasília, 21 nov. 2019. Seção 1, p. 64.

_____. Resolução ANP n. 67, de 9 de dezembro de 2011. Dispõe sobre as definições para fins de aquisição de etanol anidro combustível, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 13 dez. 2011.

_____. Resolução ANP n. 719, de 21 de fevereiro de 2018. Altera a Resolução ANP nº 67, de 9 de dezembro de 2011 e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 23 fev. 2018.

_____. Resolução ANP n. 791, de 12 de junho de 2019. Dispõe sobre a individualização das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis, no âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). **Diário Oficial**, Brasília, 14 jun. 2019.

_____. Resolução ANP n. 802, de 05 de dezembro de 2019. Estabelece os procedimentos para geração de lastro necessário para emissão primária de Créditos de Descarbonização, de que trata o art. 14 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e altera a Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018. **Diário Oficial**, Brasília, 06 dez. 2019.

CAMEREON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics using Stata: revised edition**. Stata Press, 2009. 706 p.

CAMPOS, S. K. **Fundamentos econômicos da formação do preço internacional de açúcar e dos preços domésticos de açúcar e etanol**. 2010. 141 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CARDOSO, L. C.B. *et al.* Biofuels policies and fuel demand elasticities in Brazil. **Energy Policy**, Cambridge, v. 128(C), p. 296-305, mai. 2019.

CARPIO, L. G. T. The effects of oil price volatility on ethanol, gasoline, and sugar price forecasts. **Energy**, v. 181, p. 1012-1022, 2019.

CARUSO, R. C. **Análise da oferta e demanda de açúcar no Estado de São Paulo**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **Etanol – Diário Paulínia**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol-diario-paulinia.aspx>. Acesso em: 4 de julho de 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Safra brasileira de cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 18 ago. 2019.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ETANOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSECANA-SP. **Circulares**. Disponível em: <https://www.consecana.com.br>. Acesso em: 7 jun. 2019.

_____. **Qualidade da matéria-prima**. Disponível em: <https://www.consecana.com.br>. Acesso em: 7 jun. 2019.

_____. **Manual de Instruções**. 2015. 6ª ed., 81 p. Piracicaba.

COSTA, C. C. da *et al.* Supply behavior of hydrous ethanol in Brazil. **Economia Aplicada**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 731-748, 2015.

DAVID, S. A.; INÁCIO JÚNIOR, C. M. C.; MACHADO, J. A. T. Ethanol prices and agricultural commodities: an investigation of their relationship. **Mathematics**, Basel, v. 7, art. 774, p. 1-25, 2019.

DEVADOSS, S.; KROPP, J. Impacts of trade liberalizations under the Uruguay Round on the world sugar market. **Agricultural Economics**, v. 15, n. 2, p. 83–96, 1996.

DIAS, Marina Oliveira de *et al.* Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35–51, 2015.

DIAS, L. C.; SHIKIDA, P. F. A.; ALVES, L. R. A. Determinantes das ofertas de açúcar e de álcool paranaenses (1981-2006): uma análise de co-integração. **Informe Gepec**, Toledo, v. 13, n. 2, p. 20-36, jul./dez. 2009.

DIEHL, D. **Formação do preço de etanol hidratado no Estado de São Paulo e sua relação com os mercados de açúcar e de gasolina**. 2012. 141 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

DRABIK, D.; DE GORTER, H.; JUST, D. R.; TIMILSINA, G. R. The economics of Brazil's ethanol-sugar markets, mandates, and tax exemptions. **American Journal of Agricultural Economics**, Oxford, v. 97, n. 5, p. 1433–1450, 2014.

DUTTA, A. Cointegration and nonlinear causality among ethanol-related prices: evidence from Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, Illinois, v. 10, n. 5, p. 335–342, 2018.

ELOBEID, A.; BEGHIN, J. Multilateral trade and agricultural policy reforms in sugar markets. **Journal of Agricultural Economics**, n. 57, v. 1, p. 23–48, 2006.

ESTADO DE SÃO PAULO. Lei n. 11.593, de 4 de dezembro 2003. Altera a Lei n. 6.374, de 1º de março de 1989, que dispõe sobre a instituição do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação – ICMS. **Diário Oficial - Executivo**, São Paulo, 05 dez. 2003. p.1.

_____. Decreto n. 48.379, de 29 de dezembro de 2003. Ratificam convênios celebrados nos termos da Lei Complementar federal n. 24, de 7-1-1975, aprovam convênios, protocolos e ajustes SINIEF, introduz alterações no Regulamento do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços – RICMS. **Diário Oficial - Executivo**, São Paulo, 30 dez. 2003. p. 3.

FÁVERO, L. P. L.; BELFIORE, P. P. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel, SPSS e Stata**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1187 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION– FAO. **Faostat**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 10 out. 2019.

GOHIN, A.; BUREAU, J. C. Modeling the EU sugar supply to assess sectorial policy reforms. **European Review of Agricultural Economics**, v. 33, p. 223–247, 2006.

HOSSISO, K.; RIPPLINGER, D. The value of switching production options in a flexible biorefinery. **Agricultural and Resource Economics Review**, Cambridge, v. 46, n. 1, p. 146–173, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil>. Acesso em: 10 de agosto de 2019.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA. **Valor da produção dos principais produtos da agropecuária**. Disponível em:

<http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancodedados/valorproducao>. Acesso em: 7 jun. 2019.

JANDA, K.; KRISTOUFEK, L. The relationship between fuel and food prices: methods, outcomes, and lessons for commodity price risk management. Centre for Applied Macroeconomic Analysis Methods – **CAMA Working Paper** n. 20/2019. The Australian National University, 58 p., 2019.

KOZLOVA, M. Real option valuation in renewable energy literature: research focus, trends and design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 180-196, 2017.

LAMOUNIER, W.M.; CAMPOS FILHO, M. F.; BRESSAN, A. A. Análise do trade-off na produção de açúcar e álcool nas usinas da região Centro-Sul do Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SOBER, 2006. 1 CD ROM.

LIMA, Cristina Rocha Albuquerque *et al.* Cross-correlations between Brazilian biofuel and food market: ethanol versus sugar. **Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications**, 513, p. 687-693, 2019.

LMC INTERNATIONAL LTD. **Ethanol Market Report Data**. A supplement to the monthly report. December 2019. Oxford, 2019.

LUCHANSKY, M. S.; MONKS, J. Supply and demand elasticities in the US ethanol fuel market. **Energy Economics**, Cambridge, v. 31, n. 3, p. 403–410, 2009.

MARJOTTA-MAISTRO, M. C. **Ajustes nos mercados de álcool e gasolina no processo de desregulamentação**. 2002. 197 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MARJOTTA-MAISTRO, M. C.; BARROS, G. S. C. Relações comerciais e de preços no mercado nacional de combustíveis. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 41, n. 4, p. 829–857, 2003.

MELO, A. S.; SAMPAIO, Y. S. B. Uma nota sobre o impacto do preço do açúcar, do etanol e da gasolina na produção do setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 70, n. 1, p. 61-69, jan./mar. 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira**. Disponível em:

<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana>. Acesso em: 10 dez. 2019.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Relação Anual de Informações Sociais**. Disponível em: <http://www.rais.gov.br/>. Acesso em: 30 nov. 2019.

MORAES, M. A. F. D. de; SHIKIDA, P. F. A. **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Atlas, 2002.

OLIVEIRA, S. M.; RIBEIRO, C. O; CICOONA, M. P. V. Uncertainty effects on production mix and on hedging decisions: the case of Brazilian ethanol and sugar. **Energy Economics**, Cambridge, v. 70, p. 516–524, 2018.

OLIVEIRA, M. P.; ALENCAR, J. R. de; SOUZA, G. da S. Energia renovável: uma análise sobre oferta e demanda de etanol no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SOBER, 2008. 1 CD ROM.

PANTOJA, David Eduardo Lopez *et al.* Valoração econômica da flexibilidade de produção em diferentes regiões do setor sucroalcooleiro brasileiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, São Paulo, v. 18, n. 60, p. 226-244, abr./jun. 2016.

PANZAR, J. C.; WILLIG, R. D. Economies of Scope. **The American Economic Review**, v. 71, n. 2, p. 268-272, 1981.

PEREIRA, Caroline Nascimento *et al.* Aspectos econômicos e institucionais da rotação da cana-de-açúcar com espécies vegetais. In: SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. (Org.), **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília: Embrapa, 2015. v. 1, p. 93-112.

PILLAI, V. N. Panel data analysis with Stata Part 1 - Fixed effects and random effects models. **Centre for Development Studies**, Kerala, Índia. 2016. Disponível em: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/76869/>. Acesso em: 15 set. 2019.

RASK, K. N. Clean air and renewable fuels: the market for fuel ethanol in the US from 1984 to 1993. **Energy Economics**, Cambridge, v. 20, n. 3, p. 325-345, 1998.

RODRIGUES, L.; BACCHI, M. R. P. Analyzing light fuel demand elasticities in Brazil using cointegration techniques. **Energy Economics**, Cambridge, v. 63, p. 322–331, 2017.

SANTOS, G. F. Fuel demand in Brazil in a dynamic panel data approach. **Energy Economics**, Cambridge, v. 36, p. 229-240, 2013.

SCHMITZ, T. G. Impact of the 2014 Suspension Agreement on sugar between the United States and Mexico. **Agricultural Economics**, Reino Unido, v. 49, n. 1, p. 55–69, 2018.

SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR – SECEX. **Comex Stat**. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 8 ago. 2019.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo**. Aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/zoneamento/2008/Zoneamento2008a.htm>. Acesso em: 24 ago. 2019.

SILVA, Fábio Cesar da *et al.* Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima. In: SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. (Org.), **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília: Embrapa, 2015. v. 1, p. 289-359.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE FRETES – SIFRECA. **Fretes de açúcar e etanol**. Disponível em: <https://sifreca.esalq.usp.br/>. Acesso em: 16 set. 2019

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Unicadata – dados e estatísticas**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em: 8 ago. 2019.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 848 p.

ANEXO

ANEXO A - Exemplo do certificado emitido pelo SAPCana quando do reporte dos dados quinzenais pela unidade produtora.



Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SAPCANA - Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira
MAPA/CGAE/DCAA
Recibo de lançamentos - Quinzenal

Usuário:
Data:
Hora:
Página:

Parâmetros da pesquisa

Safra:

Período de lançamento:

Dados da Instituição:

Região de produção:

Recibo:

Gerado em:

Informações sobre os lançamentos efetuados:

Cana-de-açúcar - Açúcar - Refinado amorfo					
Matéria prima / Produto / Subproduto	Responsável	Data/Hora	Tipo	Lançamento	Valor
Cana-de-açúcar - Açúcar - Refinado amorfo			Saída	Mercado interno	8.205 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Refinado amorfo			Saída	Reprocesso - Saída	2.410 t
Estoque físico do período atual					3.813 t

Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)					
Matéria prima / Produto / Subproduto	Responsável	Data/Hora	Tipo	Lançamento	Valor
Estoque físico do período anterior					138.273 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Entrada	Produção	6.030 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Entrada	Outras UPs - Entrada	727 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Entrada	Devolução mercado interno	30 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Saída	Mercado interno	2.292 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Saída	Outras UPs - Saída	579 t
Cana-de-açúcar - Açúcar - Cristal (1 a 180)			Saída	Reprocesso - Saída	12.342 t