



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



RODRIGO TEIXEIRA POLEZ

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE ETANOL
INTEGRADA À PECUÁRIA NO BRASIL E ESTADOS
UNIDOS**

Campinas
2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

RODRIGO TEIXEIRA POLEZ

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE ETANOL
INTEGRADA À PECUÁRIA NO BRASIL E ESTADOS
UNIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Campinas como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Aparecida Fracarolli

Co-orientadora: M.e.Nariê Rinke Dias de Souza

Campinas

2020

Ficha Catalográfica

**ANÁLISE COMPARATIVA DA PRODUÇÃO DE ETANOL
INTEGRADA À PECUÁRIA NO BRASIL E ESTADOS
UNIDOS**

RODRIGO TEIXEIRA POLEZ

BANCA EXAMINADORA

.....
Profª. Dra. Juliana Aparecida Fracarolli

.....
M.e. Nariê Rinke Dias de Souza

.....
Dr. Mateus Ferreira Chagas

RESUMO

A crescente demanda mundial por alternativas mais sustentáveis de geração de energia levanta o debate de substituição de métodos convencionais e combustíveis fósseis. Além disso, o crescimento populacional mundial que tende a alcançar oito bilhões de habitantes no planeta em 2023 impulsiona o desenvolvimento de novos métodos de produção de alimento e energia de forma não destrutiva ao planeta. Dessa forma, surgem sistemas agropecuários de uso mais eficiente do solo e menor emissão de GEEs, como as integrações de diferentes segmentos. Essa combinação entre produção de etanol proveniente de açúcar ou milho com utilização de co-produtos (anteriormente considerados descarte, mas já provados que possuem alto valor energético) na área de nutrição animal tem potencial para, de forma sustentável, contribuir substancialmente para essas reduções de emissões, além de promover maior eficiência na produção pecuária. O Brasil, tendo grande impacto na produção mundial tanto de etanol quanto de bovinos de corte, tem um alto potencial de desenvolvimento dessas integrações. No modelo atual, as usinas de cana-de-açúcar, concentradas principalmente no estado de São Paulo, têm um alto valor de emissão de GEEs, e no Mato Grosso, maior produtor de milho do Brasil, as usinas de etanol de milho (baseadas em modelos norte-americanos) surgem como uma boa alternativa para a agroindústria de etanol. Diante desse cenário, temos ainda a crescente tendência das usinas flex, que passaram por adaptações e podem utilizar tanto do milho quanto da cana-de-açúcar nos períodos entressafra para a produção de etanol. O presente trabalho tem como objetivo analisar algumas diferentes integrações que ocorrem no Brasil e nos EUA e trazer uma análise comparativa dos valores de emissão de GEEs. Os valores foram coletados a partir da literatura, sendo que a base de comparação será $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$. Como resultado, a utilização de integração entre esses diferentes segmentos agropecuários tende a ser uma alternativa viável em questões ambientais, sendo uma forte tendência de produção para os próximos anos.

Palavras-chave: GEEs, Etanol, Cana-de-açúcar, Milho, Integração, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing world demand for more sustainable alternatives for power generation increases the debate about replacing conventional methods and fossil fuels. Moreover, the growth of the world population, which tends to reach eight billion inhabitants on the planet in 2023, propels the development of new production methods of food and energy in a non-destructive way to the planet. In this way, agricultural systems of more efficient soil use and less GHG emission arises, such as the integration of different segments. This combination between the production of ethanol from sugar or corn with the use of co-products (once considered discard, but already proven to have a high energy value) in the nutrition animal area has the potential to, in a sustainable way, substantially contribute to the reductions of these emissions, besides promoting the greater efficiency in livestock production. Brazil, having a great impact on the production of both ethanol and beef cattle, has a high potential for the development of these integrations. In the current model, sugar cane mills, concentrated mostly in the state of São Paulo, have a bigger value of GHG emission, and in Mato Grosso, the largest corn producer of Brazil, corn ethanol mills (based on North American models) arise as a good alternative for ethanol agribusiness. Given this scenario, we still have the growing trend of flex mills, which underwent adaptations and can use both corn and sugarcane in the off-season to produce ethanol. The present work aims to analyze some different integrations that occur in Brazil and the USA and to bring a comparative analysis of the GHG emission values. The values were collected from the literature, being the basis of comparison $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$. As a result, the use of integration between these different agricultural segments tends to be a viable alternative in environmental questions, being a strong production trend for the next years.

Keywords: GHGs, Ethanol, Sugarcane, Corn, Integration, Sustainable.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Emissão de CO ₂ de etanol de milho nos EUA por componente.	20
Gráfico 2. gCO ₂ por MJ de etanol de cana-de-açúcar no Brasil por componente.	23
Gráfico 3. Emissão de CO ₂ de etanol de cana-de-açúcar no Brasil por componente.	25
Gráfico 4. Emissões de gases de efeito estufa de 1 MJ de etanol hidratado, para os diferentes cenários industriais (“berço ao túmulo”).....	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fontes de informações utilizadas nas comparações de emissão de GEEs.	17
Quadro 2. Emissão de GEEs por sistema integrado.	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Emissão de CO ₂ de etanol de milho nos EUA por componente.....	19
Tabela 2. Emissão de CO ₂ de etanol de milho nos EUA por componente.....	21
Tabela 3. gCO ₂ por MJ de etanol de milho no Brasil por componente.....	22
Tabela 4. Emissão de CO ₂ de etanol de milho no Brasil por componente.....	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivos específicos	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	11
2.1.1	Integração etanol de Cana-de-açúcar e pecuária – nutrição animal	12
2.2	ETANOL DE MILHO.....	12
2.2.1	Integração Etanolde Milho e Pecuária	13
2.3	ETANOL DE MILHO NO BRASIL.....	14
2.3.1	Usina Full	14
2.3.2	Usina Flex	15
3	METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1	ETANOL DE MILHO NOS EUA.....	18
4.2	ETANOL DE MILHO NO BRASIL.....	21
4.3	ETANOL DE CANA NO BRASIL	22
4.3.1	Integração de milho safrinha às usinas de cana-de-açúcar	26
5	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

A nova meta do Brasil no Acordo de Paris, a chamada Contribuição Nacional Determinada (NDC, da sigla em inglês) é a neutralidade nas emissões de gases de efeito estufa até 2060. Fatores como este, juntamente com o aumento da demanda mundial por alternativas mais sustentáveis de geração de energia, tendem a fomentar a criação de novos segmentos de produção de fontes de energia.

Desde 1975, com o programa Pró-Álcool que impulsionava o país a substituição de carros movidos a petróleo por carros movidos a álcool, o Brasil vem aumentando sua produção interna de etanol, sendo um dos maiores produtores do mundo. Este produto, quando comparado com a gasolina, apresenta diversas vantagens ambientais, sendo considerado uma fonte de energia renovável tendo em vista que sua produção é feita a partir de produtos agrícolas.

O álcool produzido a partir da cana-de-açúcar rende, em média, 7 mil litros por hectare, enquanto o de milho rende 3,5 mil litros. Sob o ponto de vista ambiental, a cana apresenta valores mais vantajosos, uma vez que cada unidade de energia fóssil usada na produção do combustível gera 9,3 unidades de energia e, no caso do milho, a relação é de 1 para 1,5 unidade (BORTOLETTO; ALCARDE, 2015).

O milho e a cana-de-açúcar são as principais matérias-primas mundiais responsáveis pela produção de etanol, sendo elas responsáveis por 82% do mercado mundial de biocombustíveis, tendo o Brasil e os EUA como os maiores produtores, responsáveis por 90% do etanol produzido mundialmente (BORTOLETTO; ALCARDE, 2015). Além disso, as oportunidades de aproveitamento dos subprodutos agroindustriais diferem nos dois países.

Nos EUA a integração é bem estabelecida e acontece exclusivamente com o etanol de milho, tendo ela crescido muito nos últimos 20 anos: em 2004, com 81 plantas de refinaria e produção de 12,9 bilhões de litros de etanol para 139 refinarias e produção de 29,9 bilhões de litros em 2008 (LISKA *et al.*, 2009). Já no Brasil as usinas de milho estão em processo inicial de expansão, sendo elas divididas entre Full e Flex: enquanto as usinas Full têm como sua principal atividade a produção exclusiva de etanol de milho, as usinas Flex surgem com a produção de etanol de 2 fontes diferentes, sendo elas milho e cana-de-açúcar (geralmente moem cana entre Abril e Novembro, e no período entressafra focam sua produção em etanol de

milho). Nos dois casos, tanto nas usinas de etanol de milho quanto de cana-de-açúcar, são produzidos resíduos com altos potenciais energéticos.

O aproveitamento de resíduos agroindustriais na alimentação animal atualmente, além de ser visto como uma opção de grande importância em questões ambientais propicia produção de alimentos de boa qualidade devido as suas características nutricionais(US GRAINS, 2012). Tanto a cana-de-açúcar quanto o milho possuem co-produtos que podem ser utilizados na nutrição principalmente de bovinos. Os principais são: bagaço e DDG para etanol e cana-de-açúcar, respectivamente.

1.1 JUSTIFICATIVA

O entendimento de novos modelos agropecuários e seus respectivos impactos ambientais é fundamental para atender a demanda mundial de alternativas sustentáveis de geração de energia e alimentos, tendo em vista que os problemas relacionados às mudanças climáticas globais são alguns dos maiores desafios científicos encarados pela humanidade atualmente.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é comparar cenários de integração etanol pecuária e realizar uma análise ambiental entre os mesmos.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Comparar a emissão de GEEs dentre os trabalhos citados;
- Comparar o sistema de integração milho pecuária já estabelecido nos EUA com o modelo brasileiro.
- Discutir a viabilidade ambiental de modelos de integração de cultura e pecuária em ascensão no Brasil;
- Discutir a viabilidade ambiental de usinas *flex*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é uma planta nativa do Sul da Ásia utilizada mundialmente como matéria prima da produção de açúcar e etanol. Ela, assim como o milho, pertence à família *Poaceae* possui um alto potencial comercial produzindo, dentro das utilizações anteriormente citadas, subprodutos que têm alto valor energético que podem ser empregados em outros segmentos de sua produção ou até mesmo na nutrição animal. Além disso, a época de maior disponibilidade desses produtos é no período de escassez de forragem, sendo o bagaço um importante constituinte de volumoso (LEME *et al.*, 2003).

O bagaço da cana-de-açúcar é o principal subproduto em sua moagem, correspondendo a 30% de rendimento por tonelada. Ele é obtido após a moagem e extração dos açúcares, sendo um composto protéico e energético, podendo ser uma boa alternativa para destinar a nutrição animal apesar médio potencial nutritivo.

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas produzidas nacionalmente, tendo alcançado seu maior valor de produção de etanol na safra de 2019/2020 com 35,6 bilhões de litros (7,5% a mais que 2018/2019). Nas diferentes regiões do Brasil tivemos variações de produção, com as regiões com potencial crescente: Sudeste ainda líder com 415 milhões de toneladas, Centro-oeste com 140,4 milhões e Nordeste com 49,1 milhões. Já nas regiões Sul e Norte tivemos decréscimo, com 34,4 milhões de toneladas e 3,7 milhões de toneladas de acordo com os dados de Guth (2020), respectivamente.

As condições climáticas da cultura favorecem a produção, que registrou um aumento 3,6% em massa bruta da planta, sendo que sua área foi reduzida em 1,7%. Foram 642,7 milhões de toneladas e 8,4 milhões de hectares de área colhida na safra de 2019/2020, muito por conta de áreas não propícias a colheita mecanizada e uma conseqüente migração dos produtores para outros tipos de culturas (GUTH, 2020).

A cana-de-açúcar é uma grande alternativa para o setor de biocombustíveis por conta do grande potencial produtivo e seus conseqüentes subprodutos. Sua produção concilia a sustentabilidade com os efeitos colaterais não desejáveis produzidos pela utilização de combustíveis fósseis, trazendo uma saída

ecologicamente positiva. Por ser uma fonte renovável de energia, a cana-de-açúcar emite consideravelmente menos gases do efeito estufa para a atmosfera do que os combustíveis fósseis, de forma a ser uma alternativa ambientalmente amigável para desacelerar o aquecimento global e mudanças climáticas.

2.1.1 Integração etanol de Cana-de-açúcar e pecuária – nutrição animal

Existem subprodutos da cana que são destinados a reutilização de alguma forma: Torta de filtro: proveniente da filtração do caldo extraído da cana, corresponde de 30 a 40 kg por tonelada de produto e é utilizado na produção irrigando o solo destinado ao plantio; Melaço: principal subproduto da indústria do açúcar, utilizado na produção de álcool etílico e outros processos biotecnológicos, com 40 a 60 kg por tonelada processada; Vinhaça: utilizada principalmente na fertilização de solos, com 12 a 18 litros de vinhaça por litro de álcool produzido; e Bagaço: resíduo que corresponde de 24 a 40% do produto, utilizado principalmente na geração de energia elétrica e nutrição animal.

Dentre os subprodutos citados, o principal deles é o bagaço. Apesar de ser considerado limitante para nutrição animal por conta de seu valor nutritivo, uma vez hidrolisado (tem sua digestibilidade elevada de 30 para 60%), seus aspectos custo e sustentabilidade atendem às principais demandas do mercado atual.

2.2 ETANOL DE MILHO

O milho é uma planta extensivamente utilizada como fonte de nutrição animal. Ele pertence à família *Poaceae* possui uma grande representatividade nutricional, tendo assim um alto potencial de consumo tanto humano quanto animal. O produto também possui alta adaptabilidade a diferentes condições de clima, por isso é produzido em todo o mundo e seus subprodutos vão desde alimentação, produção de filmes e embalagens biodegradáveis, até produção de etanol (CUNHA *et al.*, 2019).

O milho é uma das culturas mais importantes mundialmente, tanto do ponto de vista econômico quanto social. Na safra de 2018/2019, a produção mundial deste cereal atingiu 1123 milhões de toneladas, sendo 366 milhões produzidas pelos Estados Unidos, 254 milhões produzidas pela China e 101 milhões pelo Brasil

(SOLOGUREN, 2015). Cerca de 70% de toda a produção mundial é destinada à alimentação animal, podendo chegar a 85% em países desenvolvidos. Em termos gerais, apenas 15% de toda a produção mundial destina-se ao consumo humano (PAES, 2006).

Dentre as 1123 milhões de toneladas produzidas mundialmente na safra de 2018/2019 informadas por Sologuren (2015), cerca de 15% foi utilizada para produção de etanol. Nos EUA, a porcentagem é ainda maior, chegando a 43% do total de milho produzido sofrendo este mesmo destino, tendo como resultado uma produção de 50 bilhões de litros de etanol em 2012, enquanto no mesmo ano o Brasil produziu 23 bilhões de litros provenientes da cana-de-açúcar.

Em 1980 os EUA adotaram um programa de etanol como combustível, tendo como objetivo estabilizar o preço do milho que sofria constantes alterações e também implementar uma fonte alternativa de combustível, resultando em uma produção 8.33% maior que em 1980 (0,6 bilhão para 50 bilhões de litros em 2012). A crescente na produção resultou em 220 unidades produtoras de etanol (Brasil atualmente possui apenas 16), tendo Iowa como principal estado americano produtor de milho com 41 usinas e 14 bilhões de litros do biocombustível (28% da produção americana). Os EUA vêm expandindo rapidamente sua produção de etanol (apesar das 30 usinas que fecharam temporariamente as portas devido a recente crise estabelecida por conta do Covid-19 de acordo com Mendes (2020), mesmo que menos competitiva quando comparada com a de origem na cana-de-açúcar (BORTOLETTO; ALCARDE, 2015).

2.2.1 Integração Etanol de Milho e Pecuária

Depois de realizada a extração do etanol, o processamento do milho produz o DDG (*DriedDistillersGrains*, ou Grãos Secos de Destilaria) que é um residual da fermentação. O DDGS (*DriedDistillersFrainswithSolubles*) é obtido a partir da adição de solúveis recuperados durante o processo de separação do mosto na destilação a DDG (SPEROTTO, 2017). De acordo com USDA, a cada tonelada de milho processada, 480 quilogramas de DDGS são produzidos e só nos Estados Unidos são produzidos 40 mil toneladas, sendo 25% deste valor destinado ao mercado interno para nutrição animal.

O milho DDGS é uma ótima opção para o mercado de nutrição animal de corte para todas as fases de produção, sendo um produto altamente energético e protéico. De acordo com (US GRAINS, 2012), o DDGS apresenta até 40% de consumo da matéria seca de ração para bovinos em fase de terminação, sendo de alto desempenho de crescimento e qualidade da carne, apesar de apresentar altos valores de fósforo e excesso de proteína quando utilizado com alta taxa de alimentação desse produto. Para o caso de novilhas, ele também pode ser uma alternativa eficaz em momentos em que a disponibilidade de forragem pode se apresentar limitada.

Já para o caso de bovinos de leite, ainda de acordo com (US GRAINS, 2012), o DDGS é um potencializador de produtividade quando utilizado de forma correta. Quando adicionado entre 20 e 30% à dieta de vacas em lactação o produto tende a aumentar a produtividade quando comparado a dietas em que não são usados DDGS, apesar de não apresentar mudanças significativas na porcentagem de gordura do leite. Milho O DDGS pode ser usado efetivamente em uma ração mista total por vacas leiteiras em lactação sob condições climáticas estressantes, tornando-o um ingrediente alimentar valioso para uso em rações leiteiras em regiões tropicais e subtropicais do mundo. Quando adicionado mais de 30%, a porcentagem de proteína tende a diminuir.

2.3 ETANOL DE MILHO NO BRASIL

2.3.1 Usina Full

De acordo com os dados da (ANP, 2020), a demanda anual interna de etanol no Brasil cresceu 97% em 6 anos. Foram 9,9 milhões de m³ produzidos em 2012 para 19,4 milhões em 2018, sendo 13,3 milhões produzidos só na região Sudeste. Apesar da região representar 47% da produção do país no ano, o Centro-Oeste se destaca como uma área de expansão do mercado de etanol.

A região apresenta condições não tão favoráveis para a produção de Cana-de-açúcar em sua totalidade, porém se destaca na produção de grãos. Foram 257,6 milhões de toneladas produzidas em 2019 no país, sendo aproximadamente 100 milhões de responsabilidade da região. Por conta disso, muitos produtores e

usineiros da região decidiram inovar inserindo uma nova modalidade de produção de etanol no Brasil: as usinas de milho, ou Usinas Full.

A tendência de utilização de etanol de milho partiu de referências externas: os EUA. Toda a tecnologia de produção tem como base o processo norte americano, com exceção da fonte de energia na planta. Enquanto nos EUA é muito utilizado gás natural (Mato Grosso do Sul também utiliza a fonte), no Brasil é possível utilizar da biomassa (no caso de usinas Flex) e de cavaco de madeira para caso de usinas exclusivamente produtoras de etanol de milho (DONKE *et al.*, 2014).

A tecnologia para sua produção conta com os estágios de moagem de milho, liquefação, fermentação e destilação para obtenção do etanol. Outros subprodutos produzidos são: óleo fúsel (muito utilizado no segmento químico), vinhaça (utilizada na fertirrigação), óleo de milho (indústria alimentícia) e DDG (resíduo sólido que é transformado em DDGS e destinado a nutrição animal) (DONKE *et al.*, 2014).

2.3.2 Usina Flex

A cana-de-açúcar é um produto de alta rentabilidade quando moído, gerando altos valores de etanol, açúcar e outros subprodutos, sendo uma das principais culturas nacionais. Porém a produção dessa cultura possui uma entressafra bem definida causada pela impossibilidade tecnológica de estocagem deste material, o que resulta em 4 meses sem processamento das usinas.

O milho também é uma das principais culturas do país, tendo diversas modalidades produtivas e várias finalidades, como óleos, alimentos e etanol. Quando comparado com o etanol proveniente de cana-de-açúcar, sua rentabilidade é bem menor.

Quando comparados, os produtos apresentam diferentes valores correspondentes a produtividade. O milho, em média, possui uma produtividade de 4 mil litros por hectare produzido, enquanto a cana atinge até 7 mil litros. Além disso, de acordo com RFA (2013) enquanto o etanol de milho disponibiliza entre 1,9 e 2,3 unidades de energia para cada unidade de energia fóssil usada em sua produção, o etanol de cana-de-açúcar pode disponibilizar até nove unidades de energia para cada unidade de energia fóssil usada em sua produção.

O conceito de “Usina Flex” corresponde à produção de etanol proveniente de mais de uma matéria prima diferente. Nos parâmetros atuais, a maior utilização é

feita com cana-de-açúcar e milho, sendo uma boa alternativa a mitigar a sazonalização das usinas. Além disso, a produção múltipla possibilita uma diversidade estratégica de subprodutos, já que há um leque de oportunidades por conta da atuação de diferentes mercados.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho realizará uma análise comparativa entre diferentes modelos de produção: Integração cana com pecuária, Integração milho com pecuária e Usinas flex com integração pecuária (sendo todos os até agora citados no Brasil) e também Integração milho com pecuária nos EUA. Os do Brasil serão analisados entre si e também comparados com os dos EUA.

A questão a ser analisada será a ambiental, com foco em emissão de GEE (Gases de Efeito Estufa). Para efeitos de comparação os indicadores utilizados serão quantidade de etanol produzido (L), quantidade de gás emitido na atmosfera ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$) A análise comparativa terá como base diversas referências conforme é visto no Quadro 1.

Para a análise do presente trabalho em usinas de milho nos EUA, foram utilizados cenários de diversos autores, sendo que em todos a usina produzirá etanol de milho com co-produção de DDGs e óleos vegetais, o que demanda uma quantidade maior de milho e madeira de matéria prima.

Já para o caso de integração de usinas em sistemas de alimentação de gado, o crédito de energia do co-produto para o ciclo de vida do etanol do milho é determinado pela quantidade de combustíveis fósseis compensados pela substituição. O cenário é baseado na produção média de co-produtos e alimentação de uma média de gado de corte e laticínios por DDGS.

No presente trabalho serão analisados os fatores que influenciam na emissão de GEEs partindo da etapa agrícola (produção da cultura) até a produção de etanol nas usinas. Ou seja, não serão analisados fatores que influenciam na emissão de GEEs que se encontram após a produção de etanol, tais como distribuição e uso.

Quadro 1. Fontes de informações utilizadas nas comparações de emissão de GEEs.

Modelo	Dados utilizados
Etanol de milho nos EUA	Liskaet <i>al</i> (2009); Plevin (2009); Wang <i>et al</i> (2012)
Etanol de milho no Brasil	Moreira (2020)
Etanol de cana-de-açúcar no Brasil	Picoli (2017); Crago (2010); Souza (2017)
Etanol usinas flex Brasil	Milanez (2014)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ETANOL DE MILHO NOS EUA

	Cana integrada	Cana milho flex	Milho integrado Brasil	Milho integrado EUA
Emissões totais (gCO ₂ eq/MJ)	10,4-32,6	24,1-31,4	9	40,69 - 57

Quadro 2. Emissão de GEEs por sistema integrado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os principais componentes emissores envolvidos no cultivo de milho estão relacionados a maquinários para plantio, pulverização, colheita e armazenamento. Também são considerados os equipamentos para roçar, rastelar e coleta de palha de milho. Nos EUA, a indústria de etanol vem se expandindo desde 2005. O aumento de número de plantas fez com que o transporte, majoritariamente feito através de caminhões, diminua a distância percorrida até as usinas (GALLAGHER; YEE & BAUMES, 2016).

Para estimar os valores de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera do presente trabalho foram utilizados dados de uma usina típica de milho dos EUA, onde a energia da biomassa substituiria parte da energia de gás natural e eletricidade (aproximadamente diminuída pela metade). Apesar disso, a parte de secagem de DDGs corresponde a uma parcela significativa de energia.

O co-produto substitui uma determinada quantidade de produtos em uma dieta convencional para gado por outros à base de milho e, portanto, é considerado um crédito energético para substituir a alimentação convencional. Liska *et al.* (2009) utilizam de diversos cenários diferentes, estes separados por regiões dos EUA, para quantificar o crédito energético que a reutilização de subprodutos proporciona. O modelo matemático adotado é o de BESS e o resultado de Iowa, que é o considerado no presente trabalho, pode ser consultado na Tabela 1.

Tabela 1. Emissão de CO₂ de etanol de milho nos EUA por componente.

Componente	Categoria de emissão de GEE	gCO₂eq/MJ	MgCO₂
Produção da cultura	Fertilizante (Nitrogênio)	4,26	34,069
	Fertilizante Fósforo)	0,953	7,618
	Fertilizante (Potássio)	0,542	4,337
	Cal	2,82	22,577
	Herbicidas	1,51	12,079
	Inseticidas	0,018	141
	Semente	0,193	1,54
	Gasolina	0,355	2,837
	Diesel	1,73	13,848
	GLP	1,24	9,932
	Gás Natural	0	0
	Eletricidade	0,348	2,785
	Capital depreciável	0,268	2,144
	Emissão de N ₂ O	14,1	112,55
Biorefinaria	Gás Natural	19,7	157,346
	Gás Natural na secagem de DDGS	0	0
	Eletricidade	6,53	52,201
	Capital depreciável	0,458	3,663
	Transporte	2,11	16,851
Crédito co-produção	Diesel	0,216	1,731
	Produção de Ureia	-2,62	-20,956
	Produção de Milho	-11,4	-91,501
	Fermentação Entérica (CH ₄)	-2,64	-21,102
Total		40,691	-131,828

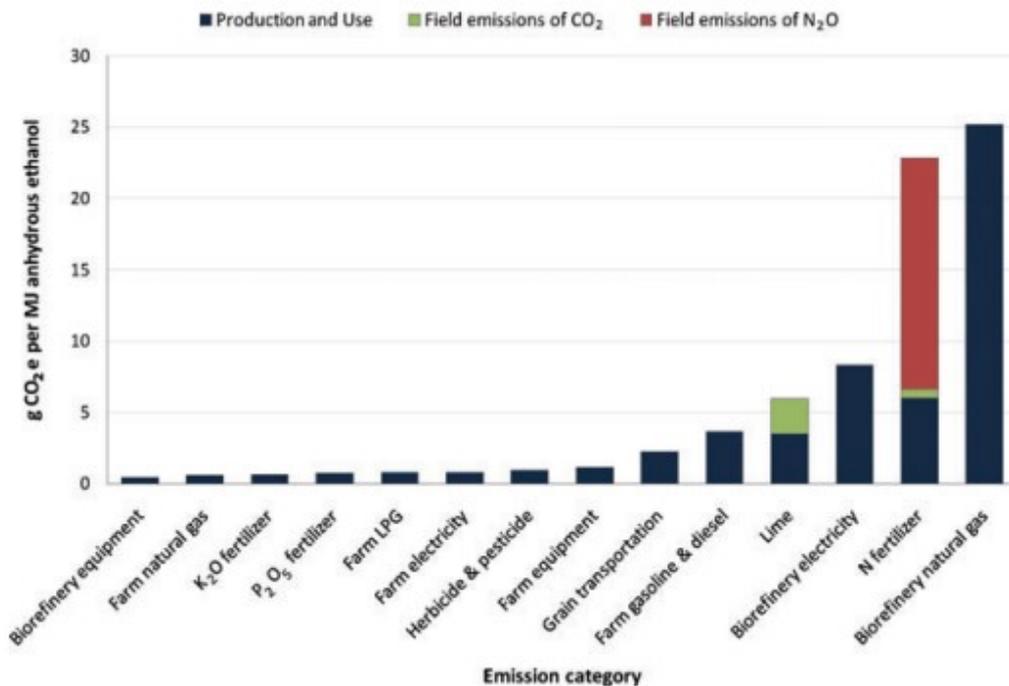
Fonte: Adaptado de Liskaet *al.*(2009).

Os valores negativos na tabela representam o crédito de co-produção. O co-produto é uma forma adotada para quantificar valores de emissão que são evitados a partir da reutilização desse produto (ração animal que é produzida e disponibilizada ao gado). No caso da alimentação do gado, o co-produto substitui uma parte da dieta convencional do animal, sendo assim adicionado um crédito para substituir a alimentação convencional que seria disponibilizada ao gado.

Já Plevin (2009) utiliza de modelos matemáticos conhecidos como GREET e BESS para estimar as emissões dos GEEs nos EUA. O objetivo de sua análise é entender os resultados dos dois modelos e analisar os motivos para divergirem tanto. Enquanto o modelo GREET é focado em cenários baseados nos de Liskaet *al.*

(2009) de “gás natural de meio-Oeste”. Já BESS (*Biofuel Energy Systems Simulator*) é um modelo que resulta em estimativas do ciclo de vida de GEEs de etanol de milho abaixo dos modelos mais convencionais.

Gráfico 1. Emissão de CO₂ de etanol de milho nos EUA por componente.



Fonte:Plevin (2009).

Ainda de acordo com Plevin (2009), ambos os modelos utilizam principalmente dados de produção de milho de 2001 (o último ano para quais os dados estavam disponíveis no USDA da época) e ambos tentam ajustar esses dados para aproximarem-se do desempenho atual. Na ausência de dados, é difícil saber se a abordagem GREET de extrapolação ou a abordagem BESS de atualização de uma parte dos dados agrícolas resulta em uma avaliação precisa. Dados mais atualizados podem ser necessários para tal análise.

Os dados de Plevin (2009) apontam o componente “refinaria” como o de maior emissão, alcançando mais de 25gCO₂eq/MJ. Liskaet *al.* (2009) também apontam a refinaria como a de maior emissão, porém apresentando valores de 28,79gCO₂eq/MJ. Apesar dos valores serem os de maior magnitude, não são considerados altos, tendo em vista que caso o abastecimento energético da usina fosse a partir da queima de carvão, esses valores seriam muito maiores.

Assim como Plevin (2009), Wang *et al.* (2012) também utilizam o modelo o modelo GREET para estimar as emissões de GEEs para plantas de fonte de energia

de gás natural. Wang *et al.* (2012) afirmam que o tratamento de DDGs na análise do ciclo de vida de etanol de milho é importante porque pode afetar os resultados em relação às emissões de GEE do etanol de milho. A tabela abaixo apresenta os principais parâmetros responsáveis pelas principais emissões:

Tabela 2. Emissão de CO₂ de etanol de milho nos EUA por componente.

Componente	Emissão (gCO₂eq/MJ)
Fertilizantes	10
Nitrogênio	17
Produção da cultura	4
Produção de etanol	31
LUC	9
Crédito	-14
Total	57

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2012)

Para Wang *et al.* (2012), para etanol de milho as usinas de etanol correspondem a 41% das emissões totais de GEE; produção de fertilizantes e emissões de N₂O dos campos de milho representam 36%; LUC é responsável por 12%; e cultivo de milho uso de energia e atividades de transporte são responsáveis por bem menores porcentagens.

Em todos os trabalhos citados de etanol de milho nos EUA, é evidente que o componente “Produção do etanol” é o de maior emissão de CO₂, seguido pela aplicação de nitrogênio. Um ponto a ser discutido é uma possível diminuição das emissões por nitrogênio através de sua melhor utilização em campo. Métodos devem ser desenvolvidos para melhorar continuamente a eficiência em que tal produto é aplicado, causando uma diminuição do produto em campo.

4.2 ETANOL DE MILHO NO BRASIL

Assim como nos EUA, o cultivo do milho e a transformação deste em etanol são os principais agentes emissores de GEEs do processo. De acordo com Moreira (2020), no caso da produção do milho, as emissões de etanol resultaram em 25,9 gCO₂eMJ, 78% do qual foi devido ao cultivo de milho e seu transporte. As emissões do processamento do milho, por outro lado, são menores do que para seu cultivo, com 60% das emissões de processamento atribuível ao vapor e eletricidade da

madeira utilizada como fonte de energia. Os valores de quantidade de gases de efeito estufa emitidos podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 3. gCO₂ por MJ de etanol de milho no Brasil por componente.

Componente	Milho EUA (92% biomassa e 8% carvão) (gCO₂eq/MJ)	Milho EUA (100% biomassa) (gCO₂eq/MJ)	Milho BR (gCO₂eq/MJ)	Cana de açúcar BR (gCO₂eq/MJ)
Matéria prima	27,6	27,6	26,2	21,1
Transporte de Matéria prima	1,9	1,9	0,6	1,4
Produção de etanol	30,2	8,7	4,7	2,6
Uso	0,2	0,2	0,5	0,8
Crédito co-produção	-12,6	-12,6	-23	-6,4
Total	47,3	25,8	9	19,5

Fonte: Moreira (2020).

Dentre os cenários apresentados por Moreira (2020), todos apresentam produção de DDGs e óleo vegetal como subprodutos de etanol de milho. Dentro das análises feitas, é possível notar que as emissões podem aumentar até 9,8 gCO₂e/MJ se a conversão das terras de pasto para eucalipto não ocorrerem (MOREIRA, 2020).

Devido à rápida expansão demilho de segunda safra em MT, junto com a variação de práticas de cultivo que surgem nas fazendas, pode-se esperar um grande aumento em questão de desempenho ambiental do milho nas fazendas. Em contrapartida, as emissões de N₂O de fertilizantes também devem ser tratadas com cautela, pois dependem das práticas de gestão do proprietário da fazenda.

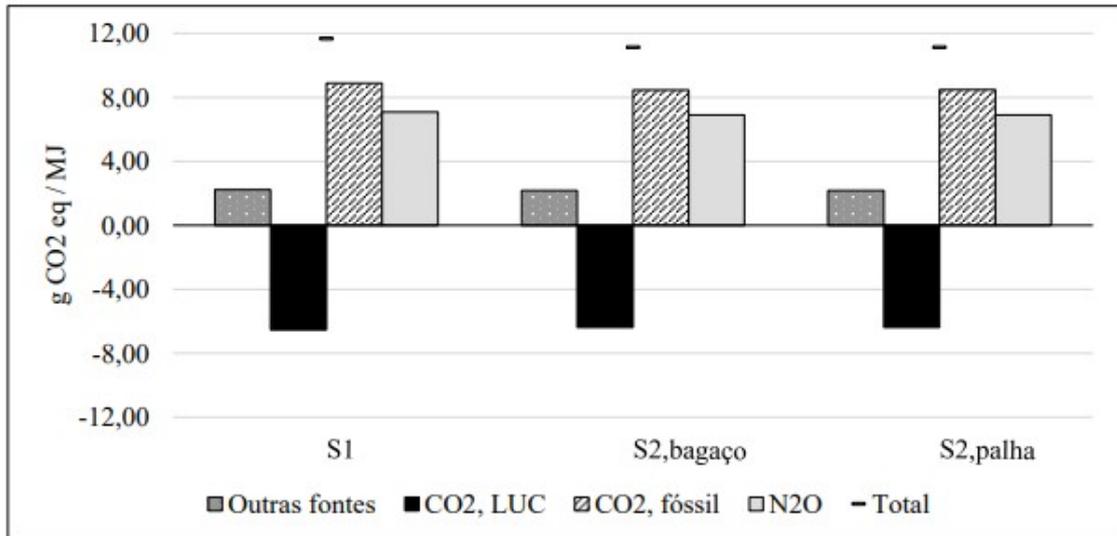
No cenário de uso de carvão como parte de fonte de energia é evidente a diferença quando comparado com o uso exclusivo de biomassa. A produção de etanol é cerca de 247% maior, sendo responsável pelo maior valor de emissão de GEEs em todo o processo, superando até o cultivo da matéria prima. Quando comparados com outros sistemas, as emissões são 322% e 128% maiores para milho e cana-de-açúcar no Brasil, respectivamente. Para que o etanol de milho dos EUA atinja essas taxas, seria necessário substituir boa parte da fonte de energia existente proveniente de madeira por gás natural.

4.3 ETANOL DE CANA NO BRASIL

Para o etanol de cana foram utilizados os dados fornecidos por Picoli (2017) de emissão de gases de efeito estufa. Diferentemente das outras fontes, Picoli

(2017) utiliza uma formatação de dados distinta, utilizando o termo “Mudanças Climáticas” para caracterizar a emissão de GEEs em seu relatório dentre os diferentes cenários analisados.

Gráfico 2. gCO₂ por MJ de etanol de cana-de-açúcar no Brasil por componente.



Fonte: Picoli (2017).

Onde S0 é o sistema de produção inicial, S1 é o de produção isolado, S2 o integrado.

É possível notar que os resultados obtidos não sofreram variações significativas nos diferentes cenários, como é possível observar na figura acima. Assim como o etanol de milho no Brasil, o etanol de cana-de-açúcar de Picoli (2017) também aponta a parte de produção da cana como o de maior emissão de GEEs do processo inteiro, sendo ela responsável por mais de 80% de todos os impactos ambientais avaliados.

Crago (2010) também utiliza dados de emissão de GEEs em seu estudo com base em um modelo matemático. O autor utilizou dados fornecidos pelo modelo do Quadro de Recursos Aéreos da Califórnia (CA-GREET) para estimar taxas de uso para cálculo de emissão a partir de fertilizantes e insumos químicos. Assim como o etanol de milho, as emissões de produção também são provenientes da desnitrificação após a aplicação. Outros valores de emissão na produção, como transporte de matéria prima, mão de obra, maquinário podem ser vistos de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 4. Emissão de CO₂ de etanol de milho no Brasil por componente.

Componente	gCO₂eq/m³	gCO₂eq/MJ
Fertilizantes	212	0,166
Nitrogênio	130	0,102
Fósforo	10	0,008
Potássio	10	0,008
Cal	60	0,047
Químicos	14	0,011
Herbicida	10	0,008
Inseticida	4	0,003
Maturador	0	0,000
Semente	0	0,000
Maquinário	107	0,084
Queima em Campo	84	0,066
Transporte	32	0,025
Refinaria	25	0,020
Crédito co-produção	0	0,000

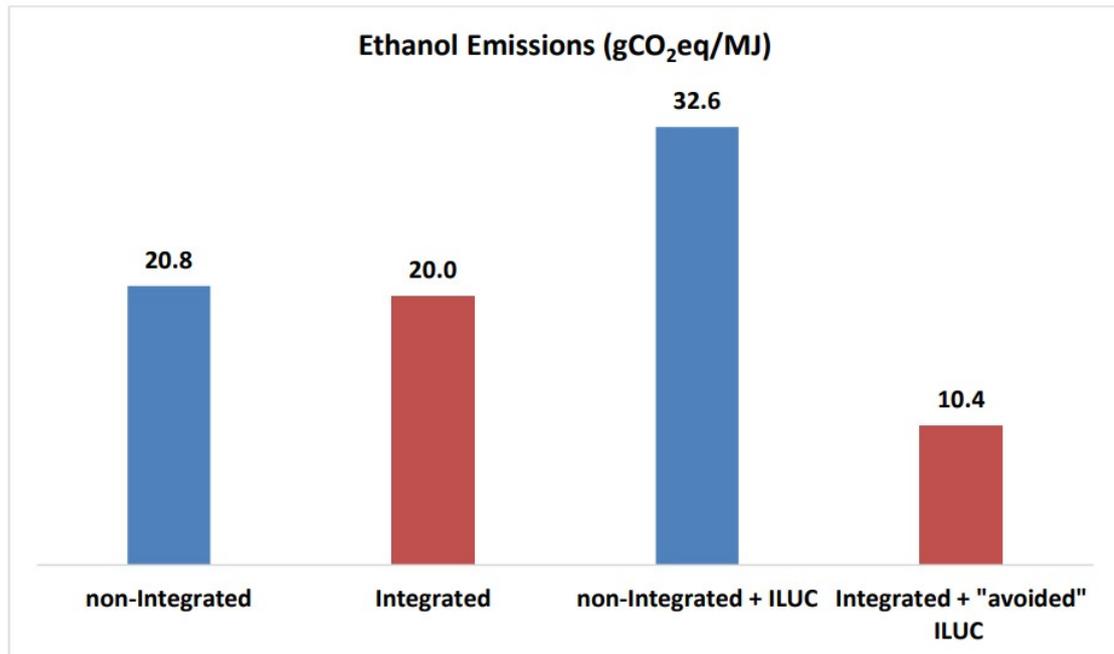
Fonte: Adaptado de Crago (2010).

Para o etanol de cana, a estimativa de Crago (2010) é de 474 kg CO₂-eq/m³ até a porta da usina (produção de etanol). O estudo também apenas leva em consideração plantas que não tratam seus subprodutos, apesar do autor citar que é possível reduzir as emissões de CO₂ em até 74 kg CO₂-eq/m³ com a reutilização de seus subprodutos.

Para o etanol de milho, o maior contribuinte de emissões de GEE no ciclo de vida é a fase de produção de etanol em si. Esta etapa é menos significativa no ciclo de vida do etanol de cana porque usinas de açúcar usam bagaço para gerar vapor e eletricidade.

Souza (2017) utiliza de 4 cenários para realizar sua análise: não integrado (planta sem a produção de ração animal), integrado (planta com produção de ração), não integrado + mudança indireta de uso da terra e integrado + mudança indireta de uso da terra evitada. Seus dados podem ser conferidos no Gráfico 3.

Gráfico 3. Emissão de CO₂ de etanol de cana-de-açúcar no Brasil por componente.



Fonte: Souza (2017)

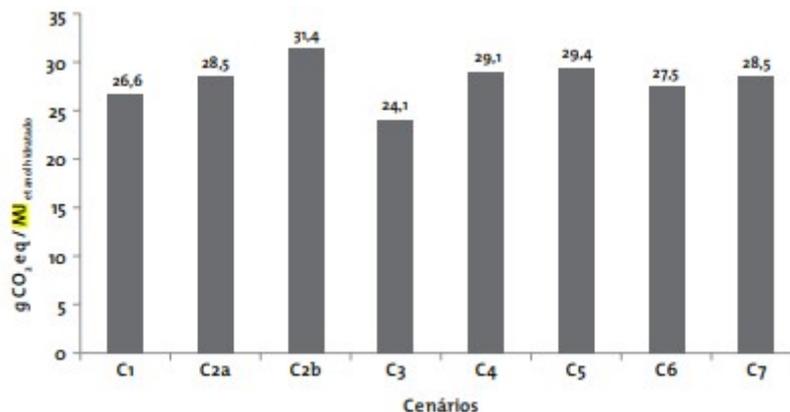
É evidente a grande diferença entre valores de emissão de GEEs em Souza (2017). Os cenários que apresentam integração são visivelmente menores que os que não apresentam. Quando comparamos o integrado com o não integrado a diferença não é tão significativo, alcançando um valor 4% menor. Já para os cenários mais extremos (não integração com utilização intensa de pastagens e integração com evitação de uso intenso) a diferença passa a ser bastante alta: 214% de diferença nas emissões do integrado para o não integrado.

O modelo dos Estados Unidos para etanol de milho e integração de gado pode ser adaptado para as condições brasileiras e aplicadas ao etanol de cana-de-açúcar e cadeias produtivas de gado. A integração pode aumentar a produção de etanol sem expandir fronteiras agrícolas, deslocamento de pastagens devido ao aumento da taxa de lotação de gado e intensificação do uso de pastagens e subprodutos do etanol da cana-de-açúcar como ingredientes da alimentação do gado. A usina de etanol deve ser modificada para direcionar parte do melaço, fermento e bagaço para alimentação animal.

4.3.1 Integração de milho safrinha às usinas de cana-de-açúcar

Os dados de emissão de GEEs para usinas flex foram retirados de Milanez (2014). Para isso, foram utilizados 8 cenários diferentes de plantas flex, alterando parâmetros como fonte de energia, tipo de processamento, aproveitamento de resíduos sólidos (DDGs) e outros. Os resultados de emissão podem ser visualizados na tabela abaixo:

Gráfico 4. Emissões de gases de efeito estufa de 1 MJ de etanol hidratado, para os diferentes cenários industriais (“berço ao túmulo”).



Fonte: Milanez (2014).

De acordo com Milanez (2014), os principais fatores que influenciaram as emissões de GEE foram à inclusão do milho no sistema, a quantidade de milho processada e o rendimento industrial de produção de etanol de milho. Considerando-se todos os processos do ciclo de vida do etanol hidratado, destaca-se o uso de fertilizantes como o que mais contribui para as emissões de GEE. O autor afirma que para os cenários que tratam da produção exclusiva de etanol de cana-de-açúcar, bem como para o que considera o processamento de uma quantidade reduzida de milho, a fertilização da cana-de-açúcar foi a atividade mais impactante. Já para os demais cenários, em que o milho ingressa em elevadas quantidades, o uso de fertilizantes na cultura de milho também teve grande contribuição. O uso de fertilizante nitrogenado, por exemplo, resulta na emissão de óxido nitroso, que tem potencial de efeito estufa 298 vezes maior que o do gás carbônico.

Quando comparamos os valores obtidos de GEEs por etanol com os de gasolina (93gCO₂eq/MJ), todos os cenários de Milanez (2014) apresentam mais de

60% de redução. Já quando comparamos os valores com os de Souza (2017) os valores não aparentam ser tão promissores. Quando comparamos os melhores cenários dos dois estudos, ainda é possível notar um aumento de 132% de emissão de GEEs. Apesar disso, Milanez (2014) afirma que segundo os critérios da EPA, o etanol produzido pela usina flex, apesar de apresentar emissões de GEE maiores que o do etanol somente de cana, seria considerado avançado, o que lhe atribui grande potencial para ser usado como alternativa aos combustíveis fósseis em diversos países.

5 CONCLUSÃO

Com crescente demanda mundial por alternativas mais sustentáveis de geração de energia e a mudança climática mundial por conta do efeito estufa, todos os modelos de produção são grandes minoradores de emissões de GEEs e conseqüentes potenciais de modelos mundiais de produção sustentável.

Todos os cenários apresentados produção de etanol apontam valores consideravelmente menos de emissão de GEEs quando há a integração de cultura-pecuária no sistema. Porém é importante ressaltar que, quando comparamos os modelos americano e brasileiro de integração de milho com pecuária, a diferença nos valores passa a ser muito excessiva. Com isso, é possível concluir que o Brasil tem um potencial gigantesco em produção de etanol de milho com integração com pecuária em aspectos ambientais. Como tivemos apenas um efeito de comparação para o etanol de milho no Brasil, novos estudos devem ser levantados.

As principais localizações que devem ser classificadas como importantes pólos de referência das novas modalidades de produção são: estado do Mato Grosso para os segmentos de integração milho-pecuária e usina flex e pecuária; e São Paulo para integração cana-de-açúcar e pecuária. Em ambos os casos, os estados são os principais pontos de produção de milho e cana, respectivamente.

Usinas flex, além de mitigarem o déficit econômico devido ao período de pausa entressafra das usinas convencionais, vai de encontro com o pensamento contemporâneo mundial de sustentabilidade e também são uma alternativa viável ambientalmente.

Apesar das conclusões feitas, mais estudos e levantamentos econômicos devem ser feitos para verificarem a viabilidade de tais modelos de usinas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Dados Estatísticos** – Vendas de combustíveis. Brasília, 23 out. 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>. Acesso em: 9 nov. 2020.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. **Visão Agrícola**, [S. l.], n. 13, p. 135-137, jul./dez. 2015. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Industrializacao-artigo1.pdf. Acesso em: 5 nov. 2020.
- CRAGO, C. L. *et al.* Competitiveness of Brazilian sugarcane ethanol compared to US corn ethanol. **Energy Policy**, [S. l.], v. 38, n. 11, p. 7404-7415, nov. 2010. DOI 10.1016/j.enpol.2010.08.016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510006300?casa_token=2rAxNtiVDboAAAAA:piawkNx1ohU-GrRrZ0JHjywxRN5B3MDmTXy7G38J4KURt6FivK3Q4D2J8WLuGogSI2wANg2Vw. Acesso em: 2 dez. 2020.
- CUNHA, B. A. *et al.* Influência da época de semeadura na severidade de doenças foliares e na produtividade do milho safrinha. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 45, n. 4, p. 424-427, out./dez. 2019. ISSN 1980-5454. DOI 10.1590/0100-5405/188038. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-54052019000400424&script=sci_arttext&tling=pt. Acesso em: 1 nov. 2020.
- DONKE, A. C. G. *et al.* Avaliação do desempenho ambiental do etanol de milho para o Brasil. *In*: Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida, 4., São Bernardo do Campo, 9-12 nov. 2014. **Anais [...]**. ABCV: São Bernardo do Campo, nov. 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1007477/1/2014AA57.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2020.
- GALLAGHER, P. W.; YEE, W. C.; BAUMES, H. S. 2015 Energy Balance for the Corn-Ethanol Industry. **Iowa State University**, United States Department of Agriculture (USDA), [S. l.], 1 fev. 2016. Disponível em: https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1042&context=econ_reportspapers. Acesso em: 1 dez. 2020.
- GUTH, T. L. F. **Análise Mensal Milho** – Junho/Julho 2019. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), Brasília, 01 jul. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-milho/item/download/28400_a7ac31374a6551d606bc8939e829427c#:~:text=Fonte%3A%20Usda%20julho%202019,do%20colhido%20em%202018%2F19. Acesso em: 3 nov. 2020.
- PAES, M. C. D. **Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho**. Circular Técnica. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Sete Lagoas, dez. 2006. ISSN 1679-1150. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/489376/1/Circ75.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2020.

LEME, P. R. *et al.* Utilização do bagaço de cana-de-açúcar em dietas com elevada proporção de concentrados para novilhos Nelore em confinamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 32, n. 6, supl. 1, p. 1786-1791, nov./dez. 2003. ISSN 1806-9290. DOI 10.1590/S1516-35982003000700029. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982003000700029&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 30 nov. 2020.

LISKA, A. J. *et al.* Improvements in Life Cycle Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions of Corn-Ethanol. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 58-74, 19 fev. 2009. DOI 10.1111/j.1530-9290.2008.00105.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1530-9290.2008.00105.x>. Acesso em: 1 dez. 2020.

MENDES, C. EUA fechará 30 usinas de etanol de milho por conta de crise no petróleo e coronavírus. **Novacana**, Notícias Agrícolas, Internacional, [S. l.], 2 abr. 2020. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/internacional/eua-fechara-30-usinas-etanol-milho-crise-petroleo-coronavirus-020420>. Acesso em: 3 nov. 2020.

MILANEZ, A. Y. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: Avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. **BNDDES**, [S. l.], p. 148-202, 4 jun. 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1921>. Acesso em: 05 dez. 2020.

MISSIO, R. L. Tratamento do bagaço de cana-de-açúcar para alimentação de ruminantes. **Archivos de zootecnia**, Córdoba, v. 65, n. 250, p. 267-278, 11 jun. 2016. ISSN 0004-0592. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/495/49545852024.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

MOREIRA, M. M. R. *et al.* Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. **Nature Sustainability**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 209-216, 13 jan. 2020. Disponível em: [nature.com/articles/s41893-019-0456-2](https://www.nature.com/articles/s41893-019-0456-2). Acesso em: 12 nov. 2020.

PICOLI, J. F. **Perfil ambiental da produção integrada de etanol e pecuária de corte**. 2017. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/330415/1/Picoli_JulianaFerreira_M.pdf. Acesso em: 2 dez. 2020.

PLEVIN, R. J. Modeling Corn Ethanol and Climate: A Critical Comparison of the BESS and GREET Models. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 495-507, 4 nov. 2009. DOI 10.1111/j.1530-9290.2009.00138.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1530-9290.2009.00138.x>. Acesso em: 1 dez. 2020.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA). **Battling for the Barrel** - 2013 Ethanol Industry Outlook. RFA: [S. l.], 6 fev. 2013. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/wp->

content/uploads/2015/09/RFA-2013-Ethanol-Industry-Outlook1.pdf. Acesso em: 2 dez. 2020.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Visão Agrícola**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 8-13, jul./dez. 2015. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Importancia-artigo1.pdf. Acesso em: 3 nov. 2020.

SOUZA, N. R. D. Avaliação tecno-econômica e ambiental da intensificação de pastagens e etanol de cana-de-açúcar. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/331249/1/Souza_NarieRinkeDiasDe_M.pdf. Acesso em: 4 dez. 2020.

SPEROTTO, F. C. S. **Abordagem multiprocessual e caracterização dos grãos secos de destilaria com solúveis (DDGS) de milho**. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/150257/sperotto_fcs_dr_bot_par.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 9 nov. 2020.

US GRAINS. **A guide to Distiller's Dried Grains with Solubles (DDGS)**. 3. ed., v. 25, n. 4, out. 2012. Disponível em: <https://grains.org/wp-content/uploads/2018/01/Complete-2012-DDGS-Handbook.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2020.

WANG, M. *et al.* Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. **Environmental research letters**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 045905, 2012. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/4/045905>. Acesso em: 3 dez. 2020.